

电子工业技术词典

磁性材料与器件

国防工业出版社

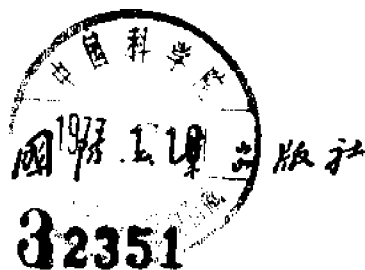
R
73.6072
174.7

电子工业技术词典

磁性材料与器件

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

3105.1/50



内 容 简 介

《电子工业技术词典》是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》(试用本)的基础上作了较大修改和增补而编写的。本《词典》是一本为广大工农兵和干部提供的深入浅出、简明实用的工具书。它也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌、扩大知识面时参考。

本《词典》共有三十四章。正文中各词汇后附有英文对照,书末附有英文索引,合订本中还附有汉字笔画索引。在出版合订本之前,将先分册出版。各分册所包括的章节内容和出版先后次序,将视具体情况而定。

本分册是《词典》第八章磁性材料与器件。内容包括:磁性基础知识,软磁材料与器件,永磁材料及其应用,磁记录材料,磁存储材料与器件,旋磁材料与器件,磁性材料制备工艺,磁性测量仪器等八节。

电子工业技术词典

磁性材料与器件

《电子工业技术词典》编辑委员会 编

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业登记证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 4¹/₄ 82 千字

1976年11月第一版 1976年11月第一次印刷 印数: 00,001—27,000 册

统一书号: 17034·29-16 定价: 0.47元

前 言

《电子工业技术词典》是在无产阶级文化大革命伟大胜利的鼓舞下，在学习无产阶级专政理论的热潮中，在电子工业发展的新形势下出版的。它是在一九六四年出版的《无线电工业技术词典》（试用本）的基础上编写的。

原《词典》自发行以来，曾受到广大读者的欢迎，为宣传、普及、推广电子技术知识起了一定的作用。十多年来，在毛主席革命路线的指引下，我国电子工业已有很大的发展，生产规模不断扩大，技术水平迅速提高，技术队伍日益壮大，电子技术的推广应用已引起国民经济各部门的重视，并在社会主义革命和社会主义建设中发挥出作用。目前，电子工业已成为国民经济的一个组成部分，电子工业战线的广大职工正在为实现第四届全国人民代表大会提出的宏伟目标而努力奋斗。为适应这一大好形势，更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务，我们对原《词典》进行了一次较大的修改和增补。内容力求反映七十年代电子技术的水平，释文尽量做到简明、通俗。目的是为了向要求对电子工业技术有一般常识的广大工农兵和干部提供一本实用的工具书；同时也可供从事某个具体专业的科技人员在了解电子工业整个领域的全貌和扩大知识面时参考。

本《词典》共分三十四章。其目录如下：

- | | |
|-----------------|-------------|
| 一、电工基础； | 二、基本电子线路； |
| 三、网络分析与综合； | 四、电波传播与天线； |
| 五、信息论； | 六、电阻、电容与电感； |
| 七、厚薄膜电路； | 八、磁性材料与器件； |
| 九、电子陶瓷与压电、铁电晶体； | 十、机电组件； |
| 十一、电线与电缆； | 十二、电子管； |
| 十三、半导体； | 十四、电源； |
| 十五、其它元器件； | 十六、通信； |

- | | |
|----------------|------------------|
| 十七、广播与电视； | 十八、雷达； |
| 十九、导航； | 二十、自动控制与遥控、遥测； |
| 二十一、电子对抗； | 二十二、电子计算机； |
| 二十三、系统工程； | 二十四、电子技术的其它应用； |
| 二十五、微波技术； | 二十六、显示技术； |
| 二十七、红外技术； | 二十八、激光技术； |
| 二十九、电声； | 三十、超声； |
| 三十一、声纳； | 三十二、专用工艺设备与净化技术； |
| 三十三、电子测量技术与设备； | 三十四、可靠性。 |

各章互有联系，并尽量避免章节间词汇的重复，故每章只有一定的系统性。正文前有章节和词汇目录，正文中各词汇后附有英文对照，最后附有汉字笔画索引与英文索引。本《词典》将先分册出版，各分册所包含的章节内容和出版先后次序将视具体情况而定。各分册无汉字笔画索引。

本《词典》的编写工作，自始至终是在毛主席革命路线的指引下，在党的领导下进行的。贯彻了“独立自主，自力更生”的伟大方针，坚持了群众路线，实行了工人、干部、科技人员和生产、科研、教学两个三结合，以及理论联系实际的原则。《电子工业技术词典》本身就是广大群众集体智慧的结晶。它的编写过程也反映了无产阶级文化大革命后我国出版战线上的新气象。

由于我们水平有限，加上时间仓促，虽然作了很大努力，但《词典》中还可能存在不少错误和不妥之处，恳请广大读者及时批评指正。

《电子工业技术词典》编辑委员会

一九七五年十月一日

目 录

一、磁性基础知识

磁性材料与器件.....	8-1	形状各向异性.....	8-4
磁偶极子.....	8-1	感生各向异性.....	8-4
磁（面积）矩.....	8-1	畴壁.....	8-4
磁偶极矩.....	8-1	布洛赫壁.....	8-4
磁极化强度.....	8-1	奈耳壁.....	8-4
磁化场.....	8-1	单畴体.....	8-4
比磁化强度.....	8-1	畴壁位移.....	8-4
自发磁化强度.....	8-2	转动磁化.....	8-4
铁磁性材料.....	8-2	磁中性化.....	8-4
反铁磁性材料.....	8-2	动态磁中性化.....	8-5
亚铁磁性材料.....	8-2	静态磁中性化.....	8-5
强磁性材料.....	8-2	热致磁中性化.....	8-5
磁有序性材料.....	8-2	交（直）流退磁.....	8-5
铁氧体.....	8-2	退磁因子.....	8-5
铁淦氧.....	8-2	退磁因子张量.....	8-5
磁性瓷.....	8-2	几何退磁因子.....	8-5
尖晶石型铁氧体.....	8-2	初始磁化曲线.....	8-5
石榴石型铁氧体.....	8-3	循环磁状态.....	8-5
磁铅石型铁氧体.....	8-3	正常磁滞回线.....	8-6
六角晶系铁氧体.....	8-3	饱和磁滞回线.....	8-6
单轴型铁氧体.....	8-3	矫顽磁场强度.....	8-6
平面型铁氧体.....	8-3	矫顽力.....	8-6
正铁氧体.....	8-3	内禀矫顽力.....	8-6
磁各向异性.....	8-3	绝对磁导率.....	8-6
磁晶各向异性.....	8-3	真空绝对磁导率.....	8-6
磁晶各向异性能.....	8-3	相对磁导率.....	8-6
磁晶各向异性常数.....	8-4	起始磁导率.....	8-6
主轴型磁晶各向异性.....	8-4	最大磁导率.....	8-7
平面型磁晶各向异性.....	8-4	振幅磁导率.....	8-7
单轴各向异性.....	8-4	增量磁导率.....	8-7
应力各向异性.....	8-4	可逆磁导率.....	8-7

纵向磁致伸缩系数·····	8-7	光磁效应·····	8-8
扭转磁致伸缩·····	8-7	强磁(性)半导体·····	8-8
磁致伸缩材料·····	8-7	磁电阻效应·····	8-8
压磁效应·····	8-7	磁卡效应·····	8-8
压磁性材料·····	8-7	磁共振·····	8-8
压磁机电耦合系数·····	8-8	核磁共振·····	8-8
压磁耦合系数·····	8-8	顺磁共振·····	8-9
磁光效应·····	8-8	铁磁共振·····	8-9
(磁光)法拉第效应·····	8-8	穆斯堡尔效应·····	8-9
(磁光)克尔效应·····	8-8	磁学常用单位制·····	8-9

二、软磁材料与器件

软磁材料·····	8-11	减落·····	8-14
环磁导率·····	8-11	减落系数·····	8-14
有效磁导率·····	8-11	磁老化·····	8-14
表观磁导率·····	8-11	金属软磁性材料·····	8-15
复数磁导率·····	8-11	工业纯铁·····	8-15
匝数因数·····	8-12	羰基铁·····	8-15
电感因数·····	8-12	电解铁·····	8-15
磁谱·····	8-12	铁硅合金·····	8-15
软磁材料截止频率·····	8-12	硅钢片·····	8-15
磁性材料的总损耗·····	8-12	电工钢·····	8-15
磁后效·····	8-12	铁铝合金·····	8-15
磁后效损耗·····	8-12	铁镍合金·····	8-15
畴壁共振·····	8-12	铝硅铁合金·····	8-16
尺寸共振·····	8-12	铁钴合金·····	8-16
功率损耗·····	8-13	热补偿合金·····	8-16
损耗角正切·····	8-13	热磁合金·····	8-16
比损耗角正切·····	8-13	磁介质·····	8-16
品质因数·····	8-13	磁性铁粉芯·····	8-16
有效品质因数·····	8-13	铁氧体软磁材料·····	8-16
表观品质因数·····	8-13	锰锌铁氧体·····	8-16
磁性材料磁滞常数·····	8-13	镍锌铁氧体·····	8-17
磁芯磁滞常数·····	8-14	超高频软磁铁氧体·····	8-17
瑞利区·····	8-14	铁氧体吸收材料·····	8-17
温度系数·····	8-14	热敏铁氧体·····	8-17
磁导率的比温度系数·····	8-14	软磁铁氧体单晶·····	8-17

磁芯·····	8-17	磁性天线·····	8-18
铁氧体天线·····	8-18	磁放大器·····	8-18

三、永磁材料及其应用

永磁材料·····	8-19	脱溶硬化型永磁体·····	8-21
退磁曲线·····	8-19	铝镍型永磁体·····	8-21
磁能积·····	8-19	铝镍钴型永磁体·····	8-21
最大磁能积·····	8-19	铝镍钴钛型永磁体·····	8-21
凸出系数·····	8-19	可加工永磁体·····	8-21
回复状态·····	8-19	稀土钴永磁体·····	8-22
回复线·····	8-19	伸长单畴微粒永磁体·····	8-22
回复磁导率·····	8-20	铂钴永磁体·····	8-22
工作点·····	8-20	锰铝永磁体·····	8-22
负载线·····	8-20	铁氧体永磁体·····	8-22
漏磁系数·····	8-20	复合永磁体·····	8-23
磁杂散系数·····	8-20	半永磁材料·····	8-23
永磁体·····	8-20	充磁·····	8-23
恒磁材料·····	8-20	内磁式磁路·····	8-23
硬磁材料·····	8-20	外磁式磁路·····	8-23
马氏体永磁体·····	8-20		

破坏比·····	8-30	泡径·····	8-34
驱动比·····	8-30	最佳工作泡径·····	8-34
无干扰“1”感应电压的温度系数·····	8-30	泡(畴)迁移率·····	8-34
驱动电流温度系数·····	8-30	磁泡畴壁迁移率·····	8-34
磁芯存储板·····	8-30	特性长度·····	8-34
Δ 噪声·····	8-30	泡畴矫顽力·····	8-35
开关磁芯·····	8-31	磁泡(畴)形成场·····	8-35
双轴磁芯·····	8-31	磁泡(畴)破灭(消灭)场·····	8-35
多孔磁芯·····	8-31	磁泡破灭半径·····	8-35
布线多孔存储板·····	8-31	硬泡·····	8-35
叠片铁氧体存储板·····	8-31	半泡·····	8-35
矩磁金属磁性材料·····	8-32	液态磁泡·····	8-35
平面磁膜·····	8-32	磁泡(畴)器件·····	8-35
耦合平面磁膜·····	8-32	磁光存储技术·····	8-36
磁镀线·····	8-32	磁光存储材料·····	8-36
磁扭线·····	8-33	锰铋膜·····	8-36
集成磁芯·····	8-33	热磁写入·····	8-36
磁泡(畴)·····	8-33	逐位存储方式·····	8-37
磁泡(畴)材料·····	8-34	磁全息照相存储方式·····	8-37
非晶泡(畴)材料·····	8-34		

六、旋磁材料与器件

旋磁效应·····	8-38	静磁表面波·····	8-40
旋磁比·····	8-38	临界磁场·····	8-40
张量磁化率·····	8-38	阈磁场·····	8-40
张量磁导率·····	8-38	磁弹耦合效应·····	8-40
右(正)旋、左(负)旋圆极 化(偏振)标量磁导率·····	8-39	微波铁氧体材料·····	8-40
横向有效标量磁导率·····	8-39	石榴石型微波铁氧体材料·····	8-41
铁磁共振线宽·····	8-39	尖晶石型微波铁氧体材料·····	8-41
有效(共振)线宽·····	8-39	磁铅石型(六角晶系)微波铁 氧体材料·····	8-41
自然共振·····	8-39	旋磁器件·····	8-41
低场损耗·····	8-39	正向损耗·····	8-41
极化面(偏振面)旋转效应·····	8-40	反向损耗·····	8-42
法拉第旋转效应·····	8-40	隔离器·····	8-42
自旋波·····	8-40	极化面(偏振面)旋转式隔离器·····	8-42
自旋波(共振)线宽·····	8-40	法拉第旋转式隔离器·····	8-42
静磁模·····	8-40	共振式隔离器·····	8-42

场移式隔离器·····	8-42	锁式旋磁器件·····	8-45
边导模隔离器·····	8-42	铁氧体开关·····	8-45
集总元件隔离器·····	8-43	微波铁氧体相移器·····	8-45
环行器·····	8-43	铁氧体调制器·····	8-45
极化面(偏振面)旋转式环行器·····	8-43	铁氧体调相器·····	8-45
法拉第旋转式环行器·····	8-43	铁氧体调幅器·····	8-45
结环行器·····	8-43	钇铁石榴石单晶器件·····	8-46
Y型环行器·····	8-44	磁调谐振腔·····	8-46
T型环行器·····	8-44	旋磁滤波器·····	8-46
同轴环行器·····	8-44	电调滤波器·····	8-46
微带环行器·····	8-44	磁调旋磁振荡器·····	8-46
集总参数环行器·····	8-44	旋磁限幅器·····	8-46
集总元件结环行器·····	8-44	微波铁氧体混合集成电路·····	8-46
相移式环行器·····	8-44	磁光器件·····	8-46
大功率环行器·····	8-44	磁光调制器·····	8-46
低温环行器·····	8-45		

七、磁性材料制备工艺

氧化物法·····	8-47	热处理·····	8-48
盐类热分解法·····	8-47	磁场成型·····	8-48
共沉淀法·····	8-47	带工艺·····	8-48
热压·····	8-47	金属磁膜工艺·····	8-48
喷雾干燥法·····	8-48	液相外延工艺·····	8-49
注浆法·····	8-48	化学气相淀积工艺·····	8-49
平衡气氛烧结法·····	8-48		

八、磁性测量仪器

磁化装置·····	8-50	磁秤·····	8-51
亥姆霍兹线圈·····	8-50	核磁共振磁场测量仪·····	8-52
电磁铁·····	8-50	振动样品磁强计·····	8-52
脉冲强磁装置·····	8-50	振动线圈磁强计·····	8-52
超导磁体·····	8-50	转矩仪·····	8-52
磁导计·····	8-51	铁磁示波器·····	8-53
冲击检流计·····	8-51	直流磁性自动测试仪·····	8-53
磁通计·····	8-51	交流磁性自动测试仪·····	8-53
高斯计·····	8-51	对称双扼磁导仪·····	8-53

一、磁性基础知识[●]

磁性材料与器件

magnetic materials and devices

磁性是物质最基本的属性之一。自然界中存在的物质按其磁性可分为：顺磁性物质、抗磁性物质、铁磁性物质、反铁磁性物质、亚铁磁性物质等。其中，铁磁性物质和亚铁磁性物质属于强磁性物质，一般所说的磁性材料都指这两类。

磁性材料可分为金属磁性材料和铁氧体磁性材料两大类，它们又各有多晶、单晶、薄膜等形式。按其磁特性和应用，又可分为软磁、永磁、磁记录、矩磁、旋磁、压磁、磁光等材料。

磁性器件是利用磁性材料的磁特性和各种特殊效应制成的转换、传递、存储能量和信息的零部件。在电力和电子工业中应用很广，特别是在雷达、通信、广播、电视、电子计算机、自动控制、仪器仪表中已成为不可缺少的组成部分。

磁性材料与器件的发展和磁学、固体物理学、化学工艺学、无线电电子学、金属学、核物理学等的发展有密切的联系，它们相互促进，不断向新领域扩展。

磁偶极子

magnetic dipole

一个磁体的两端具有极性相反而强度相等的两个磁极，它表现为磁体外部磁力线的出发点和汇集点，当磁体无限小时，就成为一个磁偶极子。它所产生的外磁场与在同一个位置上的一个无限小面积的电流回路（电流元）产生的外磁场相等效。

磁（面积）矩

magnetic (area) moment

是表征磁偶极子磁性强弱和方向的一个物理量。磁偶极子的磁（面积）矩为

$$\vec{m} = i \cdot \vec{A}$$

式中 \vec{m} ——磁（面积）矩（安·米²）；

i ——电流强度（安）；

\vec{A} ——电流回路的面积（米²）。

磁（面积）矩的方向按右手螺旋法则决定。

磁偶极矩

magnetic dipole moment

它与磁（面积）矩 \vec{m} 具有相似的物理意义，只是单位不同，数值不同。它们的关系为 $\vec{j}_m = \mu_0 \vec{m}$ 。 j_m 的单位为韦伯·米； m 的单位为安·米²； μ_0 为真空的绝对磁导率。

磁极化强度

magnetic polarization

是单位体积内磁偶极矩的矢量和，即

$$\vec{j}_m = \frac{\sum \vec{j}_m}{V}$$

它与磁化强度 \vec{M} 具有相似的物理意义，只是单位不同，数值不同。它们的关系为 $\vec{j}_m = \mu_0 \vec{M}$ 。 J_m 的单位为韦伯/米²； μ_0 为真空的绝对磁导率。

磁化场

magnetizing field

是用来使磁性体感应出磁化强度的外磁场。它可以是恒定磁场、交变磁场或脉冲磁场。

比磁化强度

specific magnetization

● 磁性基础知识方面词汇，除本章所列外，另参见“电工基础”（章）。

是单位质量的磁性体内磁矩的矢量和。它与磁化强度 \vec{M} 的关系为 $\vec{\sigma} = \frac{\vec{M}}{\rho}$ 。 ρ 为磁性体的密度。

自发磁化强度

spontaneous magnetization

指由自发磁化所产生的单位体积内的磁矩的矢量和。

铁磁性材料

ferromagnetic materials

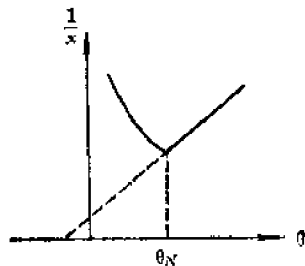
指具有铁磁性的材料。例如, 铁、钴、镍及其合金, 某些稀土元素的合金和化合物。在居里温度以下, 当加上外磁场时, 各磁畴内的磁矩趋向于外磁场方向整齐排列, 使材料具有较大的磁化强度。

反铁磁性材料

antiferromagnetic materials

指具有反铁磁性的材料。例如 Cr、Mn、MnO、Cr₂O₃、ZnFe₂O₄。

在奈耳温度以下, 材料具有微小的正磁化率, 但与顺磁性材料不同, 其磁化率随温度上升而上升, 并在奈耳温度达到最大值。磁化率随温度变化的典型曲线如图。



反铁磁物质磁化率与温度变化的关系

亚铁磁性材料

ferrimagnetic materials

是指具有亚铁磁性的材料。例如各种铁氧体材料。

在奈耳温度以下, 当加上外磁场时, 各磁畴的净磁矩趋向于外磁场方向整齐排列, 使材料具有较大的磁化强度。

强磁性材料

strong magnetic materials

是铁磁性材料与亚铁磁性材料的统称。

磁有序性材料

magnetically ordered materials

是铁磁性材料、反铁磁性材料与亚铁磁性材料的统称。

铁氧体

ferrites

一般是指以氧化铁和其它铁族或稀土族氧化物为主要成分的复合氧化物。它们大都具有亚铁磁性。

常用的铁氧体材料按晶格类型分为三种: 1. 尖晶石型铁氧体, 主要用作软磁、旋磁、矩磁材料; 2. 石榴石型铁氧体, 主要用作旋磁材料和磁泡材料; 3. 磁铅石型铁氧体, 主要用作永磁、高频软磁、毫米波旋磁材料。

与金属磁性材料相比, 铁氧体具有下列特点: 1. 铁氧体的电阻率远比金属高, 约为 $1 \sim 10^{12}$ 欧姆·厘米。因此, 在交变磁场中涡流损耗和趋肤效应均比较小。在微波领域中, 铁氧体还具有旋磁性, 可制成各种旋磁器件。2. 饱和磁化强度低。因此, 不适用于需要高磁能密度的场合 (如电力工业)。3. 居里温度一般比较低。

铁淦氧

ferrites

是“铁氧体”的旧名称。

磁性瓷

magnetic ceramics

是“铁氧体”在工业上的旧名称。

尖晶石型铁氧体

spinel type ferrites

这类铁氧体的分子式一般为 $MO \cdot Fe_2O_3$, 式中 M 为二价的金属离子, 常见的有 Mn、Co、Cu、Zn、Ni、Mg、Fe 等。它与天然的尖晶石 $MgO \cdot Al_2O_3$ 具有相同的晶体结构, 属于面心立方晶系。每个晶胞含有 8 个分子式, 其中有 8 个 M^{2+} 离子和 16 个 Fe^{3+}

离子, 此外还有 32 个 O^{2-} 离子。

尖晶石型铁氧体是应用最广的一种铁氧体。其中用作软磁材料的有 $MnZn$ 系、 $NiZn$ 系等铁氧体; 用作矩磁材料的有 $MgMn$ 系、 $LiNi$ 系、 $LiMn$ 系等铁氧体; 用作微波旋磁材料的有 $MgMn$ 系、 $NiZn$ 系、 $NiCu$ 系、 Li 系等铁氧体。

石榴石型铁氧体

garnet type ferrites

这类铁氧体的分子式类似于天然石榴石 $(Fe, Mn)_3 \cdot Al_2(SiO_4)_3$, 晶体结构属于体心立方晶系。

常用石榴石有 $Y_3Fe_5O_{12}$ (简称 YIG) 和其它元素置换的石榴石, 如 $Y_{3-y}R^{+3}_yFe_{5-y}A^{+3}_yO_{12}$ (式中, R^{+3} 为离子半径与 Y^{+3} 相近的稀土元素, A^{+3} 为离子半径与 Fe^{+3} 相近的离子)。此外, 还有用非三价离子置换的石榴石, 如 $BiCaV$ 石榴石。

石榴石型铁氧体每个晶胞含有 8 个分子式; Fe 离子占据 24 个四面体中心间隙 (24d) 和 16 个八面体中心间隙 (16a); Y^{+3} 离子占据由 8 个邻近的氧离子构成的十二面体中心间隙 (24c)。

石榴石型铁氧体是一种很重要的微波旋磁材料和磁泡材料。

磁铅石型铁氧体

magneto-plumbite type ferrites

这类铁氧体的分子式类似于天然磁铅石 $Pb(Fe_{7.5}Mn_{2.5} \cdot Al_{0.5}Ti_{0.5})O_{19}$, 晶格结构属于六角晶系。

磁铅石型铁氧体可分成下列五种: M 型 ($BaFe_{12}O_{19}$), 即钡铁氧体永磁材料; W 型 ($BaMe^{+2}_2Fe_{16}O_{27}$), $W = M + 2S$; X 型 ($Ba_2Me^{+2}_2Fe_{28}O_{46}$); Y 型 ($Ba_2Me^{+2}_2Fe_{12}O_{22}$); Z 型 ($Ba_3Me^{+2}_2Fe_{24}O_{41}$), $Z = M + Y$ 。其中, Me 为 Mn 、 Fe 、 Co 、 Ni 、 Zn 、 Mg 等离子; S 代表一个尖晶石分子式; Ba 可用 Sr 、 Pb 代换。

这类铁氧体的特点是, 具有强烈的磁晶各向异性, 其自发磁化方向优先趋向于六角轴 (c 轴), 称为单轴型铁氧体; 或者优先趋向于与 c 轴垂直的方向, 称为平面型铁氧体。这些特点是用作永磁材料、高频软磁材料和毫米波旋磁材料的很好条件。

六角晶系铁氧体

hexagonal ferrites

即“磁铅石型铁氧体”。

单轴型铁氧体

uniaxial ferrites

见“磁铅石型铁氧体”。

平面型铁氧体

planar ferrites

见“磁铅石型铁氧体”。

正铁氧体

orthoferrites

这类铁氧体的分子式为 $RFeO_3$, 式中 R 为 Y 或一部分稀土元素。它的晶体结构与天然的钙钛石 ($CaTiO_3$) 相同, 属于正交晶系。其中, O^{2-} 占据面心位置, Fe^{+3} 占据体心位置, R^{+3} 占据立方体顶点位置。

正铁氧体具有单轴各向异性, 饱和磁化强度很低, 约为 100 高斯, 可以用作磁泡材料, 但它的泡径较大, 迁移率较低。

磁各向异性

magnetic anisotropy

沿磁性晶体不同方向磁化时, 达到同样的磁化强度 (一般指饱和磁化强度) 需要不同的能量, 这种现象称为磁各向异性。

能量最低的方向称为易磁化方向 (轴); 能量最高的方向称为难磁化方向 (轴)。

磁晶各向异性

magnetocrystalline anisotropy

磁性单晶体由于晶体结构上的各向异性所产生的磁各向异性。

磁晶各向异性能

magnetocrystalline anisotropy energy

将磁性单晶体沿某一方向磁化到饱和时,其单位体积所需的能量,用符号 F_K 表示。

磁晶各向异性常数

magnetocrystalline anisotropy constant

表示磁性单晶体各向异性强弱的常数。

(1) 在立方晶系情况下,磁晶各向异性能与自发磁化强度 \vec{M}_s 和晶轴方向夹角的关系为

$$F_K = K_0 + K_1(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2) + \dots$$

式中 α_1 、 α_2 、 α_3 分别为 \vec{M}_s 与晶轴 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ 夹角的余弦; K_1 、 K_2 分别是一级与二级磁晶各向异性常数; K_0 为常数项,与方向无关,所以通常被省略。

(2) 在六角晶系情况下

$$F_K = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots$$

式中 θ 为自发磁化强度 \vec{M}_s 与主轴 $\langle 0001 \rangle$ 的夹角。

主轴型磁晶各向异性

mainaxial magnetocrystalline anisotropy

对于六角晶系,其易磁化轴为 $\langle 0001 \rangle$ 轴 (c 轴)的磁晶各向异性。

平面型磁晶各向异性

planar magnetocrystalline anisotropy

对于六角晶系,其易磁化方向处于 $\langle 0001 \rangle$ 平面内的磁晶各向异性。

单轴各向异性

uniaxial anisotropy

只有一个易磁化轴的磁各向异性。

应力各向异性

stress anisotropy

受到应力作用的磁性体,通过磁致伸缩效应所产生的磁各向异性。

形状各向异性

shape anisotropy

除了球形对称的磁性体以外的其它磁性体,由于自退磁场的影响所产生的磁各向

异性。

感生各向异性

induced anisotropy

某些磁性材料在制造或处理过程中所感生的磁各向异性。如材料经过磁场处理所感生的磁各向异性等。

畴壁

domain wall

在相邻的磁畴之间,存在着磁矩方向逐渐改变的过渡层,此过渡层称为畴壁。

畴壁有布洛赫壁和奈耳壁两种。

布洛赫壁

Bloch wall

畴壁中磁矩方向保持与畴壁平面平行逐渐过渡的畴壁称为布洛赫壁。

奈耳壁

Neel wall

畴壁中的磁矩方向保持与薄膜材料的表面平行逐渐过渡的畴壁称为奈耳壁。它出现在厚度很薄的薄膜材料中。

单畴体

single-domain body

磁性体的尺寸小到一定程度时,可以形成一个稳定的磁畴,这样的磁性体称为单畴体。

畴壁位移

domain wall displacement

在有效磁场(外磁场减去磁性体内部的自退磁场)作用下,自发磁化方向接近于外场方向的畴长大,而自发磁化方向与外场方向偏离较大的邻近畴相应地被压缩,使畴壁发生位移,这种磁化过程称为畴壁位移。

转动磁化

rotation magnetization

在有效磁场的作用下,畴内磁矩转向有效磁场方向的磁化过程。

磁中性化

magnetic neutralization

使磁性体恢复到磁中性状态的过程。一般有动态磁中性化、静态磁中性化和热致磁中性化三种方法。磁中性化旧称为退磁。

动态磁中性化

dynamical magnetic neutralization

将足够强的交变磁场或反复改变方向的直流磁场作用于磁性体, 然后逐渐减小磁场的强度到零值, 由此得到磁中性状态的过程称为动态磁中性化。

静态磁中性化

statical magnetic neutralization

加一个与磁性体原磁化方向相反的外磁场, 使得在去掉此磁场后磁性体的磁感应强度恰好为零。此过程称为静态磁中性化。

热致磁中性化

thermal magnetic neutralization

将磁性体加热到居里温度以上, 然后在无磁场作用下进行冷却, 由此得到磁中性状态的过程称为热致磁中性化。

交(直)流退磁

A. C. (D. C.) demagnetization

即“动态磁中性化”的旧名称。

退磁因子

demagnetizing factor

各向同性磁性材料制成的椭球形样品处于均匀恒定的外磁场 \vec{H}_0 中, 这时磁性体内部的磁场 \vec{H}_i 也是均匀的, 并可表示为

$$\vec{H}_i = \vec{H}_0 + H_s = \vec{H}_0 - \vec{N} \cdot \vec{M}$$

式中 \vec{M} 是样品的磁化强度, 在这种情况下, 它也是均匀的; $H_s = -\vec{N} \cdot \vec{M}$ 称为自退磁场, 而 \vec{N} 称为退磁因子张量。如果坐标轴与椭球的三个主轴 a 、 b 、 c 方向相重合, 则张量 \vec{N} 变为对角张量, 通常称这一对角张量的分量 N_a 、 N_b 、 N_c 为退磁因子。由于这里 N 仅与磁性体几何形状有关, 所以也称为几何退磁因子。 N_a 、 N_b 、 N_c 三者的关系为

$$N_a + N_b + N_c = 1 \quad (\text{MKSA单位制})$$

对于球形样品, $a = b = c$,

$$N_a = N_b = N_c = \frac{1}{3},$$

对于长圆柱样品, $a \gg b = c$, $N_a \approx 0$,

$$N_b = N_c \approx \frac{1}{2},$$

对于极薄的圆盘形样品, $a \ll b = c$,

$$N_a \approx 1, \quad N_b = N_c \approx 0.$$

对于非均匀磁化的磁性体, 退磁因子 N 已失去简单的几何意义, 其本身也成为 \vec{M} 的函数。

退磁因子张量

demagnetizing factor tensor

退磁因子张量 \vec{N} 亦称“张量退磁因子”。见“退磁因子”。

几何退磁因子

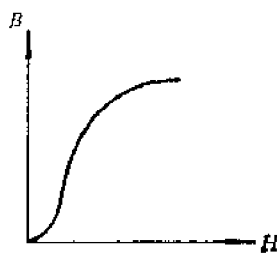
geometric demagnetizing factor

见“退磁因子”。

初始磁化曲线

initial magnetization curve

磁性体从磁中性状态开始, 受到一个从零起单调增加的磁场作用时, 所得到的磁感应强度(或磁化强度或磁极化强度)随磁场强度变化的曲线。初始磁化曲线通常简称磁化曲线。典型的曲线如图所示。



典型的磁化曲线

循环磁状态

cyclic magnetic condition

磁性体受到某一交变磁场的反复磁化时, 最初, 交变场的每一个周期所得到的磁滞回线虽然很接近, 但不相同。经过多次反复磁化后, 所得到的磁滞回线比较稳定, 它与交变磁场的循环次数无关, 这称为循环磁状态。

正常磁滞回线

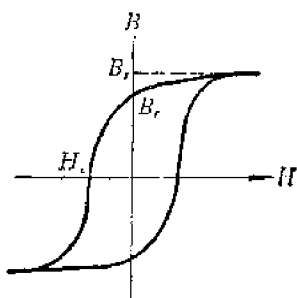
normal hysteresis loop

磁性体处于循环磁状态时得到的相对于座标原点对称的磁滞回线。

饱和磁滞回线

saturation hysteresis loop

当交变磁化场的振幅足够大, 能使磁化达到饱和状态, 这样得到的正常磁滞回线称为饱和磁滞回线。这时如再加大强化场的振幅, 磁滞回线的形状基本上不再变化。



饱和磁滞回线

矫顽磁场强度

coercive field strength

矫顽磁场强度 H_{cm} 指从磁性体的某一磁化状态, 把磁场单调地减小到零并反向增加, 使磁感应强度 (或磁化强度, 或磁极化强度) 沿正常磁滞回线减到零时的磁场强度。

就矩磁材料而言, 矫顽磁场强度指经最大磁场强度 (H_m) 磁化后使磁感应强度减小到零的磁场强度。

矫顽力

coercive force; coercivity

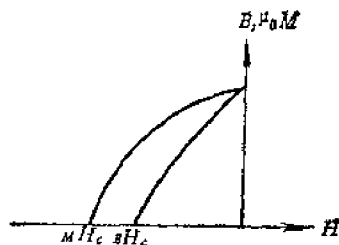
矫顽力 H_c 指从磁性体的饱和磁化状态, 把磁场单调地减小到零并反向增加, 使磁感应强度沿饱和磁滞回线减到零时的磁场强度。

内禀矫顽力

intrinsic coercive force

内禀矫顽力 MH_c , JH_c 指从磁性体的饱

和磁化状态, 把磁场单调地减小到零并反向增加, 使磁化强度 (或磁极化强度) 沿饱和磁滞回线减小到零时的磁场强度。 MH_c 总是大于 H_c 。

内禀矫顽力 MH_c 的定义图解**绝对磁导率**

absolute permeability

单位磁场强度在物质中所感生的磁感应强度, 即 $\mu = \frac{B}{H}$ 。它表示物质磁化的难易程度。

真空绝对磁导率

absolute permeability of vacuum

即真空的绝对磁导率, 其值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ (MKSA 单位制); $\mu_0 = 1$ (CGS 实用单位制)。

相对磁导率

relative permeability

相对磁导率 μ_r 即物质的绝对磁导率与真空绝对磁导率之比。一般所说的磁导率均指相对磁导率。

起始磁导率

initial permeability

磁性体在磁中性状态下磁导率的极限值。即

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$$

式中 μ_0 ——真空绝对磁导率 ($\text{T} \cdot \text{m/A}$);

H ——磁场强度 (安/米);

B ——相应的磁感应强度 (韦伯/米²)。

对于在弱磁场下使用的软磁材料, 起始磁导率是一个很重要的参数。

最大磁导率

maximum permeability

在初始磁化曲线上, 各点的磁导率随磁场强度的不同而不同, 其最大值称为最大磁导率 μ_{\max} 。

振幅磁导率

amplitude permeability

磁性体在交变磁场(无恒定磁场存在)中被磁化时, 在某一指定振幅的磁场(或磁感应强度)下的磁导率称振幅磁导率 μ_a 。

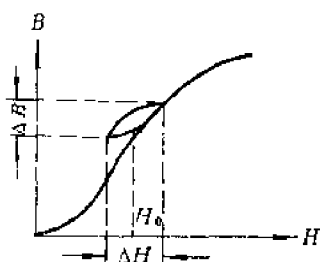
它是磁场强度(或磁感应强度)振幅的函数, 其最大值称为最大振幅磁导率。

增量磁导率

incremental permeability

在恒定磁场 H_0 作用下, 迭加一个较小的交变磁场, 这时磁性体对于交变磁场的磁导率, 即 $\mu_\Delta = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$ 称为增量磁导率。式中 μ_0 是真空的绝对磁导率, ΔH 为交变磁场强度的峰峰值(安/米), ΔB 为相应的磁感应强度的峰峰值(韦伯/米²)。

由于磁滞的关系, 虽在相同的恒定磁场强度 H_0 的条件下, 由于交变磁场的振幅不同, μ_Δ 的值也不相同。



增量磁导率的定义图解

可逆磁导率

reversible permeability

当交变磁场强度趋于零时, 增量磁导率的极限值, 即

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \mu_\Delta$$

纵向磁致伸缩系数

longitudinal magnetostriction constant

指磁性体由磁中性状态磁化到饱和时, 在磁化方向上其长度的相对变化, 即 $\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$ 。 Δl 是在磁化方向上测得的长度 l 的变化量。

扭转磁致伸缩

twist magnetostriction

如果一圆柱状强磁体同时受沿轴线的纵向磁场和沿圆周的横向磁场的作用, 则其合成磁场为螺旋形, 因而由磁致伸缩产生的应变(应变)亦为螺旋形(扭转), 这种现象叫扭转磁致伸缩。某些机械滤波器就是利用这现象制成的。

磁致伸缩材料

magnetostriction materials

指主要利用磁性物质磁致伸缩效应的材料。但在绝大多数场合, 是利用磁致伸缩材料的压磁效应。见“压磁性材料”。

压磁效应

piezo-magnetic effect

指由于磁致伸缩, 磁性体在一定的偏磁场和交变磁场同时作用下将发生同频率的机械振动。同样, 一定频率的机械振动也可使磁性体的磁化状态发生变化。这种现象称为压磁效应。

压磁性材料

piezo-magnetic materials

指可以利用其压磁效应作成器件的磁性材料。这类材料有镍、镍铁合金、镍锌系铁氧体、镍铜系铁氧体等。由于电阻率和机械强度不同, 金属压磁性材料适用于低频, 特别是大功率的场合, 铁氧体压磁性材料适用于较高的频率。

压磁材料的主要用途是制造超声器件(如超声发生器、超声接受器、超声探伤器、超声钻头、超声焊接器等), 水声器件(如声纳、回声探测仪), 机械滤波器, 混频器, 超声延迟线等。

压磁机电耦合系数

piezo-magnetic mechano-electronic
coupling factor

它是表示压磁性材料中总磁能转换为机械能多少的一个系数,用符号 k 表示。

当压磁性体处于自由振动状态而其工作频率远低于其共振频率时,

$$k^2 = \frac{\text{转换成机械能的磁能}}{\text{材料中的总磁能}}$$

k 值与材料的磁化状态有关。

压磁耦合系数

piezo-magnetic coupling factor

即“压磁机电耦合系数”。

磁光效应

magneto-optical effect

磁光效应是指磁场对光和材料的相互作用的影响。即在磁场作用下,材料的电磁特性发生变化,从而使光的传输特性变化。磁光效应一般包括:法拉第效应、克尔效应、科登-貌登效应、瓦格特效应和塞曼效应。其应用参阅“磁光器件”。

(磁光)法拉第效应

(magneto-optical) Faraday effect

平面偏振光通过介质时,如果介质在沿着光的传输方向被磁化,那么光的偏振面将发生旋转,这种现象称为法拉第效应。

(磁光)克尔效应

(magneto-optical) Kerr effect

指平面偏振光从磁化介质的表面反射时变为椭圆偏振光,其偏振面相对于入射光旋转的现象,即椭圆长轴相对于原来偏振面旋转一定的角度。旋转方向与磁化方向有关。

光磁效应

photomagnetic effect

指某些磁性材料(如钇铁石榴石、磁性半导体)在光照射影响下磁性能的变化,即由光子感生磁性变化的效应。如材料的起始磁导率、矫顽力、铁磁共振场等,在光照射

后都会发生变化。

强磁(性)半导体

strong magnetic semiconductor

是一种兼有强磁性和半导体性质的材料。它大致可以分为两类:1. 稀土硫属化合物,如 EuO ; 2. 硫属铬尖晶石,其化学式为 ACr_2X_4 (式中, A 为二价离子,如 Zn 、 Cd 、 Hg 、 Fe ; X 为硫属元素,如 S 、 Se 、 Te)。

磁电阻效应

magneto-resistance effect

当铁磁性物质处于磁场中时,其电阻将发生变化,这种现象称为磁电阻效应。当磁场方向平行于测量电阻方向时,称为纵向磁电阻效应;当磁场方向和测量电阻方向垂直时,称为横向磁电阻效应。

利用磁电阻效应可测量磁场强度。

磁卡效应

magneto-caloric effect

当顺磁和铁磁物质在绝热条件下被磁化时,它的温度升高,此现象称为磁卡效应。此效应是可逆的,即当绝热退磁时,它的温度将降低,为现代获得极低温方法之一。

磁共振

magnetic resonance

指与物质磁性和磁场有关的共振现象。磁共振一般需要一个稳恒磁场(包括各种内场)和一个交变场。当交变场与稳恒磁场等满足一定的条件时,样品将强烈吸收交变场的能量,这就是磁共振现象。磁共振在本质上是一种能级间跃迁的量子效应。

磁共振现象与物质磁性有密切的联系。它包括顺磁共振、铁磁共振、亚铁磁共振、反铁磁共振、回旋(抗磁)共振、核磁共振等。

磁共振现象在物理学、量子电子学、化学、生物学等方面都有重要的应用。

核磁共振

nuclear magnetic resonance

物质中的核磁矩在稳恒磁场和交变磁场同时作用下,当交变磁场与稳恒磁场等满足一定的关系时,核磁矩将对交变场的能量产生共振吸收,这种现象称为核磁共振。

利用核磁共振现象可观察和研究原子核的磁性,精确地测量磁场(核磁共振磁场测量仪),研究物质的精细结构(核磁共振波谱仪)等。

顺磁共振

paramagnetic resonance

顺磁体中的电子磁矩在稳恒磁场作用下,电子发生塞曼能级分裂,电子自旋在此相邻能级间跃迁,辐射(或吸收)一定频率的电磁波。因此,当顺磁体在稳恒磁场和交变磁场同时作用下,当交变磁场和稳恒磁场等满足一定的条件时,顺磁体将强烈地吸收该交变场的能量,这种现象称为顺磁共振。

顺磁共振一词有时也包括在广义的电子自旋共振中。

利用顺磁共振现象可做成固体量子放大器。此外,顺磁共振现象又是研究物质结构的重要的近代技术,在化学、物理学、生物学等方面都有很多应用。

铁磁共振

ferromagnetic resonance

旋磁材料(或媒质)在稳恒磁场和与其相垂直的交变磁场同时作用下,当稳恒磁场大小和交变磁场的频率等满足一定关系时,旋磁张量磁导率各分量的虚部显著增大,这时旋磁材料将对交变磁场的右旋分量,即与磁矩进动方向一致的分量产生强烈吸收,这种现象称为铁磁共振。

对于无限大的各向同性旋磁材料,在一致共振情况下,铁磁共振角频率 ω_0 与稳恒磁场 H_0 的关系为 $\omega_0 = \gamma H_0$ 。 γ 为材料的旋

磁比。

在远离抵消点时,铁磁共振和亚铁磁共振无显著区别,可统称为铁磁共振或强磁共振。

利用铁磁共振效应可制成共振式隔离器、旋磁滤波器等。此外,设计微波铁氧体器件时,都必须考虑铁磁共振,并设法避开共振区。

穆斯堡尔效应

Mössbauer effect

是固体中原子核的无反冲 γ 射线的共振吸收效应。其主要特点是分辨率高、选择性强、灵敏度高等。利用这些特点可以研究固态物质中核外电子的组态、电子和核的相互作用(超精细作用)、晶体的对称性和晶场特性等。因而在钢铁工业、固体物理学(特别是磁学)、化学、生物学(特别是分子生物学)、地质学、医学等方面都有广泛和重要的应用,是目前研究固态物质微观结构的一种有力工具。例如在磁学应用方面,可以利用这一效应测定离子在铁氧体不同晶位中的分布,确定铁氧体中的磁结构的类型,辨别不同价态的离子(如 Fe^{+2} 和 Fe^{+3}),研究各种磁体的相变等。从广义上讲,穆斯堡尔效应也是一种磁共振现象。

磁学常用单位制

conventional unit system for magnetism

磁学中常用的单位制有两种,一种是国际标准单位制(SI)中的电磁部分,即米·千克·秒·安培(MKSA)单位制,它是国际权威组织规定的标准;另一种是厘米·克·秒(CGS)实用单位制,它是习惯上常用的单位制。

两种单位制之间的换算关系如下表。

MKSA单位制与 CGS 实用单位制换算表

	MKSA	MKSA/CGS 实用	CGS实用/MKSA	CGS 实 用
磁通量 Φ	韦伯	10^{-8}	10^8	麦克斯韦
磁(面积)矩 m	韦伯·米	1.257×10^{-9}	7.96×10^8	
磁化强度 M	特斯拉	1.257×10^{-3}	7.96×10^2	高 斯
磁感应强度 B	韦伯/米 ²	10^{-4}	10^4	高 斯
磁场强度 H	安/米	7.96×10	1.257×10^{-2}	奥斯特
磁通势 F_m	安	7.96×10^{-1}	1.257	吉 伯
真空磁导率 μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米			1
磁晶各向异性能	焦耳/米 ³	10^{-1}	10	尔格/厘米 ³
磁能积	焦耳/米 ³	10^{-1}	10	尔格/厘米 ³

注: $1.257 \approx 4\pi \times 10^{-1}$, $7.96 \approx \frac{1}{4\pi} \times 10^2$.

二、软磁材料与器件

软磁材料

soft magnetic materials

容易磁化和退磁的磁性材料称为软磁材料。其特点是矫顽力低,磁导率高。

软磁材料可分为金属软磁材料和非金属软磁材料。前者主要用于低频范围,后者可用至高频、超高频范围。

在电力工业中,用软磁材料作为变压器、电动机、发电机的铁芯。在无线电工业中,软磁材料用于继电器、变压器、电表、磁放大器 and 各类电感线圈、磁头等。

环磁导率

toroidal permeability

在环形磁芯上测得的磁导率称为环磁导率 μ_{tor} 。当磁芯上的绕组均匀分布,其杂散磁场可以忽略不计时,环磁导率近似于材料的磁导率。

环磁导率的测量方法适用于测量任何一种磁导率。在高频测量时,须用其它方法代替绕线的方法。

环磁导率的计算式为

$$\mu_{tor} = \frac{l}{4\pi N^2 A} \cdot L \times 10^7$$

式中 A ——环形磁芯横截面积(米²);

l ——平均磁路长度(米);

N ——线圈匝数;

L ——磁芯线圈的自感(亨)。

当环形磁芯具有矩形截面时,环磁导率的计算式为

$$\mu_{tor} = \frac{L \times 10^7}{2N^2 h \ln \frac{D}{d}}$$

式中 d, D ——环形磁芯的内、外径(米);

h ——磁芯高度(米)。

有效磁导率

effective permeability

指具有由不同材料(包括气隙)或不同形状的同种材料构成闭合磁路(当杂散磁场可以忽略时)的磁性元件的自感所确定的磁导率 μ_e 。

1. 在测量中,测得自感 L 后的计算式为

$$\mu_e = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{L}{N^2} \sum \frac{l}{A} \times 10^7$$

2. 若元件各部分尺寸及磁导率均已知时,

$$\mu_e = \sum \frac{l}{A} / \sum \frac{l}{\mu A}$$

式中 L ——元件的自感(亨);

N ——线圈匝数;

A ——各部分磁路的横截面积(米²);

l ——对应于该截面的磁路长度(米);

μ ——该段磁路材料的磁导率。

表观磁导率

apparent permeability

有磁芯时线圈的自感 L 与无磁芯时同一线圈的自感 L_0 之比。即

$$\mu_{app} = \frac{L}{L_0}$$

这个参量主要用于开路磁芯,其值决定于线圈的形状和线圈与磁芯的相对位置。

复数磁导率

complex permeability

磁性体在交变磁场的作用下,磁感应强度与磁场强度都可以用复数形式表示。它们的比值就是复数磁导率(简称复磁导率),即

$$\bar{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\bar{B}}{H} = \mu' - j\mu''$$

式中 \bar{B} ——复数磁感应强度 (韦伯/米²);

\bar{H} ——复数磁场强度 (安/米);

μ_0 ——真空绝对磁导率;

$$j = \sqrt{-1}。$$

虚部分量 μ'' 是表征磁性体在交变场中磁能损耗的参数, μ' 为复数磁导率实部。

匝数因数

turns factor

线圈匝数 N 与该线圈自感量 L 的平方根之比, 即 $\alpha_N = \frac{N}{\sqrt{L}}$ 称为匝数因数。它与磁芯的形状、尺寸、磁导率、线圈的绕法以及线圈与磁芯的相对位置等有关。

电感因数

induction factor

线圈的自感量 L 与线圈匝数 N 的平方之比, 即 $A_L = \frac{L}{N^2}$ 称为电感因数。它与磁芯的形状、尺寸、磁导率、线圈绕法以及线圈与磁芯的相对位置等有关。

磁谱

magnetic spectrum

广义的磁谱指物质的磁性与频率的关系。对于软磁材料, 磁谱通常指 μ' , μ'' 与频率的关系。

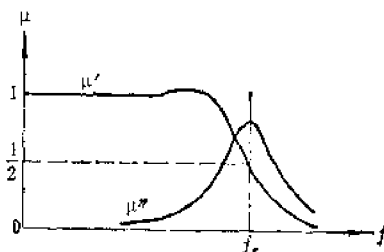
狭义的磁谱仅指磁性材料在弱交变磁场中的起始磁导率 μ_i (或起始磁化率 x_i) 与频率的关系。

软磁材料截止频率

cutoff frequency for soft magnetic materials

磁性材料的复磁导率 $\bar{\mu}$ 是频率的函数, 对应于复磁导率实部 μ' 突然下降和虚部 μ'' 急剧增加的频率称为截止频率, 用符号 f_c 表示。

通常把 μ' 下降到 $\frac{1}{2}\mu'$ 所对应的频率定为截止频率。典型的曲线如图示。



截止频率的定义图解

磁性材料的总损耗

total loss of magnetic material

指磁性材料在交变磁场中所吸收的并以热的形式耗散的能量。它包括磁性材料的磁损耗和介电损耗。

磁损耗又包括涡流损耗、磁滞损耗和剩余损耗。

磁后效

magnetic aftereffect

磁后效一般是指在磁化过程中磁化强度随时间的变化滞后于磁场变化的现象。

磁后效的机理有两类。一类是由热涨落引起的不可逆磁后效, 这类磁后效有时也称为约旦(Jordan)型后效。另一类是由离子、空穴或电子的扩散所引起的磁后效, 这种后效是可逆的, 有时也称为李希特(Richter)型后效。

磁后效损耗

magnetic aftereffect loss

由磁后效引起的损耗。

畴壁共振

domain wall resonance

当给磁性材料加以交变场时, 畴壁受到力的作用, 在其平衡位置附近振动。当交变场的频率等于畴壁振动的固有频率时, 就发生畴壁共振。材料在磁性能上的表现为 $\mu' - 1 \approx 0$, μ'' 达极大值, 这就产生共振吸收的现象。

尺寸共振

dimensional resonance

在磁性材料中传播的电磁波频率为 f ,

其在材料内部的波长为 $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\mu\varepsilon}}$ (c 为光速, μ 、 ε 分别为磁性材料的磁导率和介电常数)。当材料尺寸接近于材料内部电磁波半波长的整数倍时, 就会在样品中形成驻波, 此时样品就好像是一个谐振腔, 即产生尺寸共振。例如, 锰锌铁氧体有较高的磁导率和介电常数, 当频率 $f = 1$ 兆赫时, $\mu \approx 10^3$, $\varepsilon \approx 5 \times 10^4$, 磁性材料内的波长 $\lambda \approx 4$ 厘米, 当样品尺寸约为 2 厘米时就会发生尺寸共振。

功率损耗

power loss

在高磁感应强度下测得的磁芯的总损耗。其单位是瓦/公斤或瓦/米³。

损耗角正切

tangent of the loss angle

它是复磁导率的虚部分量与实部分量的比值, 即 $\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'}$ 。它是磁性材料在交变磁场每周期中损耗的能量与存储的 2π 倍最大能量之比。

在弱磁场下, 损耗角正切为涡流损耗角正切 $\tan \delta_e$ 、磁滞损耗角正切 $\tan \delta_h$ 和剩余损耗角正切 $\tan \delta_r$ 之和, 即 $\tan \delta = \tan \delta_e + \tan \delta_h + \tan \delta_r$ 。

比损耗角正切

loss per unit permeability

是磁性材料的损耗角正切与起始导磁率之比 ($\tan \delta / \mu_i$)。

在弱磁场下, 当漏磁通可略去时, 则比损耗角正切与气隙长度无关。即

$$\frac{\tan \delta_i}{\mu_i} \approx \frac{\tan \delta'}{\mu_e}$$

式中 μ_e ——磁场强度趋于零时有气隙磁芯的有效磁导率;

$\tan \delta'$ ——有气隙磁芯的损耗角正切。

品质因数

quality factor

它是损耗角正切的倒数。即

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{\mu'}{\mu''} = \frac{\mu'_s}{\mu''_s} = \frac{\mu'_p}{\mu''_p}$$

式中

Q ——品质因数;

$\tan \delta$ ——损耗角正切;

μ'_s, μ''_s ——串联系数磁导率的实数和虚数部分;

μ'_p, μ''_p ——并联系数磁导率的实数和虚数部分。

一般要求磁性材料的 Q 值愈大愈好。

有效品质因数

effective quality factor

是含有磁芯的线圈的损耗角正切的倒数, 即

$$Q_e = \frac{\omega L}{R_{eff}}$$

式中 R_{eff} 是磁性材料的磁损耗与线圈的铜损耗之和的等效电阻。

表观品质因数

apparent quality factor

是含有磁芯的线圈的品质因数 Q_e 与不含磁芯的线圈的品质因数 Q_0 的比值。即

$$Q_{app} = \frac{Q_e}{Q_0}。式中 Q_e, Q_0 应在某一给定的$$

相同频率下测得。

磁性材料磁滞常数

hysteresis constant of magnetic material

在瑞利区内, 磁滞比损耗 $\frac{\tan \delta_h}{\mu_e}$ 与磁感应强度峰值 \hat{B} 之比称为材料的磁滞常数 η_B (米²/韦伯), 即

$$\eta_B = \frac{\tan \delta_h}{\mu_e \hat{B}}$$

在正弦交变磁场的情况下, 磁感应强度的峰值 $\hat{B} = \frac{U}{4.44fNA}$ (韦伯/米²), 式中 U 为线圈端电压的有效值 (伏), f 为测量频率 (赫), N 为线圈匝数, A 为磁芯横截面积 (米²)。

磁滞比损耗与磁场强度峰值 \hat{H} 之比也

称为磁性材料磁滞常数 η_H 。

磁芯磁滞常数

hysteresis constant of core

1. 在瑞利区内,由磁滞引起的损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta_h$ 与测量线圈中电流的峰值 \hat{i} (安)和自感 L (亨)的平方根乘积之比称为磁芯磁滞常数 η_i (安⁻¹·亨^{-1/2}),即

$$\eta_i = \frac{\operatorname{tg} \delta_h}{\hat{i} \sqrt{L}}$$

2. 如果测量线圈的端电压峰值为 \hat{u} (伏),电源角频率为 ω ($\omega = 2\pi f$, f 为频率),则磁芯磁滞常数也可以写为

$$\eta_u = \frac{\operatorname{tg} \delta_h \cdot \omega \sqrt{L}}{\hat{u}}$$

η_B 、 η_H 、 η_i 和 η_u 之间的关系是

$$\eta_B = \eta_H \frac{1}{\mu_0 \mu_c} = \eta_i \cdot \sqrt{\frac{V_c}{\mu_0 \mu_c^3}} = \eta_u \sqrt{\frac{V_c}{\mu_0 \mu_c^3}}$$

式中 V_c 为磁芯的有效体积。

瑞利区

Rayleigh region

磁性材料在足够弱的交变磁场中,其磁导率与磁场强度成线性关系的区域称为瑞利区。

温度系数

temperature coefficient

1. 在两个给定的温度之间,被测量的相对可逆变化除以温度之差称为该量的平均温度系数 (不包括被测量的不可逆变化),以 α 或 T_k 表示。

例如:磁导率的平均温度系数 α_μ 为

$$\alpha_\mu = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \cdot \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\theta_2 > \theta_1)$$

式中 μ_1 ——温度 θ_1 时的磁导率;

μ_2 ——温度 θ_2 时的磁导率。

2. 在某一温度,当温度变化很小时,平均温度系数的极限值为

$$\alpha'_\mu = \frac{1}{\mu_i} \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta\mu}{\Delta\theta}$$

磁导率的比温度系数

specific temperature factor of the permeability

磁导率的平均温度系数除以磁导率,即

$$\frac{\alpha_\mu}{\mu_1} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1^2} \cdot \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\theta_2 > \theta_1)$$

减落

disaccommodation

磁性体经过磁中性化 (完全退磁) 后,放置在不机械和热干扰的环境中,起始磁导率随时间而下降的现象,称为减落 D (或 DA)。它可表示为

$$DA = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\lg \frac{t_2}{t_1}} \cdot \frac{1}{\mu_1}$$

式中 μ_1 ——磁中性化后,在时间 t_1 (秒)测得的起始磁导率;

μ_2 ——磁中性化后,在时间 t_2 (秒)测得的起始磁导率。

有时减落也表示为

$$DA = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1}$$

减落系数

disaccommodation factor

起始磁导率随时间的相对变化与时间对数之比近似为常数。因此减落系数定义为

$$DF = \frac{DA}{\mu_1}$$

磁老化

magnetic aging

磁性材料经历较长时间后,由于各种原因引起其内部结构发生变化而导致磁性的改变,称磁老化 I_a 。例如磁导率的变化 $I_a = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1}$ 。式中 μ_1 、 μ_2 分别为老化前后测得的磁导率。

老化与减落不同,减落指可逆变化,而老化指自然变化,是不可逆的。为了增加使用时的稳定性,常采用人工老化。

金属软磁性材料

metal soft magnetic materials

指由金属或合金制成的软磁性材料。同铁氧体软磁性材料相比,它具有高的饱和磁感应强度和低的矫顽力。

这类材料有工程纯铁(包括工业纯铁、羰基铁、电解铁等),铁硅合金,铁镍合金(分为高镍铁镍合金和低镍铁镍合金两种),铁铝合金,铁硅铝合金,铁钴合金和热补偿合金等。

这类材料的电阻率很低,一般为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 欧姆·厘米;因此只适用于直流、低频和高磁场等场合。

工业纯铁

Armco iron

又称阿姆柯铁。它是一种含碳极低的软铁,由炼钢平炉精炼制得。它的起始磁导率为500~1000,最大磁导率可达5000,矫顽力为0.9奥斯特。其主要用途是制造继电器轭铁、磁屏蔽和电磁体等。

羰基铁

carbonyl iron

由五羰基化铁 $[\text{Fe}(\text{Co})_5]$ 分解制得的铁称为羰基铁。它是含有少量碳和氧的纯铁,是一种良好的高频磁介质材料。

用化学方法制得的羰基铁是圆球形细颗粒,其直径可为一微米到十几微米。羰基铁的球形颗粒形状有利于压制成型,同时磁稳定性较好。

电解铁

electrolytic iron

电解铁是用硫酸铁或氯化铁以电解方法得到纯度为99.95%的铁。它的起始磁导率为1000,最大磁导率为20000,矫顽力为0.09奥斯特。

它主要用作生产精密合金的原材料。

铁硅合金

Fe-Si alloy

含硅0.5~4%的铁硅合金,比纯铁的磁滞损耗低,电阻率也较高,适于在工频和音频高磁场下使用。为减少涡流损耗,须将铁硅合金热轧成0.35或0.5毫米厚的片材,冲成一定形状,叠片使用,因此一般称为硅钢片。它在电力工业中的用量最大,所以也常叫电工钢。

冷轧铁硅合金带,在沿轧制方向形成高斯织构,在轧制方向使用时能充分利用其磁性能,降低损耗。根据使用频率不同,带的厚度也不同(一般为0.02~0.2毫米)。实际应用时要将冷轧铁硅合金带绝缘,卷绕,最后制成一定形状(如E形,C形等)的磁芯。

在电力工业中,铁硅合金主要用于电机,变压器;在电子工业中,主要用于电源变压器、音频变压器、脉冲变压器等。

硅钢片

silicon steel sheet

即“铁硅合金”。

电工钢

electrical sheet

即“铁硅合金”。

铁铝合金

Fe-Al alloy

铁铝合金指含铝5~16%的铁合金。它的特点是起始磁导率和电阻率较高,性能接近低镍含量的铁镍合金。由于不含镍,因而具有较大的经济意义。但铁铝合金较脆,不易加工,因而影响了它的应用。

铁铝合金可代替低镍铁镍合金用于通信变压器,也适用作记录磁头和超声换能器材料。

铁镍合金

Fe-Ni alloy

铁镍合金又称坡莫合金(permalloy),含镍量一般在38~90%这个范围内。按其含镍量的多少可以分为高镍(Ni70~80%)铁镍合金和低镍(Ni40~50%)铁镍合金。

两大类。其中含钼者,有时又称为钼坡莫合金。为提高磁性能和电阻率,改善温度稳定性,简化热处理工艺,常常加入钼、铬、铜、硅、锗、铟等元素。

低镍铁镍合金在弱磁场下有较高的磁导率、高的电阻率、低的磁滞损耗。其典型磁性能是起始磁导率 3000,最大磁导率 30000,饱和磁感应强度 10000 高斯,矫顽力小于 0.15 奥斯特。

高镍铁镍合金在弱磁场下具有极高的磁导率、较高的电阻率和低的矫顽力。其典型磁性能是起始磁导率 30000,最大磁导率 120000,饱和磁感应强度 7000 高斯,矫顽力 0.01 奥斯特。

这类合金一般制成带材。根据使用频率不同,带的厚度可从 0.01 毫米到 2.5 毫米。它的磁性能也与带厚有关,带越薄,起始磁导率越低。

铁镍合金的缺点是对应力较敏感,且磁性能与热处理关系极大。而提供使用的材料是未经处理的,因此使用者必须掌握热处理工艺,并对材料进行绝缘处理。

铝硅铁合金

Al-Si-Fe alloy

它是成分为 9.6% Si、5.4% Al、85% Fe 的软磁合金材料。其典型性能是起始磁导率 3500,最大磁导率 117000,矫顽力 0.022 奥斯特,饱和磁化强度 11000 高斯,剩磁 3350 高斯,电阻率 81 欧姆·厘米。

这种材料脆而坚硬,属于不可锻合金,只能采用铸造的方法来制造零件。它可作为磁头材料和粉碎作为磁介质材料。

铁钴合金

Fe-Co alloy

这是一种以铁和钴为主要成分的软磁合金。它是目前磁性材料中饱和磁感应强度最高的一种合金。这种合金可用作电磁体的磁极(极靴)和耳机中的振动薄片等。

热补偿合金

thermal compensation alloy

它是含镍 30% 左右的一种低居里点铁镍合金,其磁感应强度-温度曲线在室温与 120℃ 之间随温度增加而下降。这种磁感应强度的负温度系数可用来补偿永磁体磁路中永磁体的温度系数,使永磁体磁路的特性在较大的温度变化时更为稳定。

热磁合金

thermomagnetic alloy

即“热补偿合金”。

磁介质

magnetic dielectric

由磁性粉末与绝缘介质混合压制成的磁零件叫磁介质,又称铁粉芯。羰基铁、铝硅铁、钼坡莫合金,是制造磁介质的三种主要原材料。

由于它涡流损耗小,磁介质可用于较高频率,其磁导率的稳定性也比未制成磁介质前的材料为高。

磁介质可制成各种形状,如环形、杯形、圆柱形等。它用于音频、高频电感线圈,小型变压器等。

磁性铁粉芯

magnetic powder core

即“磁介质”。

铁氧体软磁材料

soft magnetic ferrites

它是铁氧体材料中应用广泛和产量较大的一类。这种材料起始磁导率高,电阻率高,因此高频损耗较小。可以用在低频、中频、高频、甚至超高频范围。

它主要有尖晶石结构的锰锌系、镍锌系等,以及磁铅石结构的六角晶系平面型铁氧体两大类。

锰锌铁氧体

Mn-Zn ferrite

指以氧化铁、氧化锰、氧化锌为主要成

分的复合氧化物,属于尖晶石结构。分子式为 $[\text{Mn}_y\text{Zn}_{1-y}]_{1-x}\text{Fe}_{2+x}\text{O}_4$ 。它是软磁铁氧体中主要材料之一。

多年来,由于添加杂质,控制烧结气氛,改进工艺等,材料性能获得很大改善。高起始磁导率材料, μ_i 可达 40000; 高 μQ 材料,在 100 千赫下 μQ 可达 1.25×10^6 ; 高饱和磁感应强度材料, B_s 可达 5000 高斯。

Mn-Zn 铁氧体一般在 1 千赫到 10 兆赫的频率范围内使用。可作电感器、变压器、脉冲变压器、滤波器等磁芯,以及天线棒、磁头等。

现已制出锰锌铁氧体单晶材料和热压铁氧体等材料,均具有独特的性能。

镍锌铁氧体

Ni-Zn ferrite

以氧化铁、氧化镍、氧化锌为主要成分的复合氧化物,属于尖晶石结构。分子式为 $[\text{Zn}_y\text{Ni}_{1-y}]_{1-x}\text{Fe}_{2+x}\text{O}_4$ 。

材料电阻率较高,可在 1~300 兆赫的高频下使用。在低频使用时,性能不如锰锌铁氧体好。可用作电视机的中周变压器、磁头、短波天线棒、调谐电感电抗器以及磁饱和放大器等的磁芯。还可在高频大磁场下,用作发射机终端的级间耦合变压器磁芯,以及用作质子同步加速器的空腔谐振器的加速磁场。

超高频软磁铁氧体

ferroxplana

这类铁氧体的晶体结构为六角晶系(即磁铅石型)。它具有一个易磁化晶体平面。其截止频率比较高,宜于在超高频范围内使用。其中以 Co_2Z ($\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$) 的 μQ 特性最好。以适量的其它元素取代钴,以及不断改进工艺,已制出在 2000 兆赫下, μQ 积达 100 的产品。

这类材料主要用于电调电感器、宽频变压器、扫频磁芯、吸收材料等。

铁氧体吸收材料

ferrite absorbent materials

系利用铁氧体磁损耗对电磁波进行吸收的原理制成的一种材料。例如,锰锌铁氧体、镍锌铁氧体、六角晶系平面型铁氧体等,均可用作吸收材料,制成吸收层可薄达数毫米。为了提高使用频率和应用方便,常把铁氧体粉末与氯丁橡胶、泡沫塑料、水泥等混合,制成所需形状的铁氧体吸收材料。可用于制作无回波隔离室壁和在微波系统中用作匹配负载等。

热敏铁氧体

heat sensitive ferrite

指利用铁氧体的磁导率和饱和磁化强度随温度变化的特性,制成各种热敏元件的铁氧体材料。例如,利用某些铁氧体在居里温度突然失去磁性的特性,制成热敏开关、多谐振荡器、温度补偿器、热敏发电机,以及其它各种热动装置等。

软磁铁氧体单晶

soft magnetic ferrite single crystal

用一般多晶铁氧体作原料,用不同的方法可制成各种软磁铁氧体单晶,它比多晶材料具有更多独特的性能,例如有磁、电、光、机械等的各向异性和密度大的特点。因此,它不仅可供研究铁氧体的各种本征特性之用,而且还可利用定向切割获得各种优良的性能。用坩埚熔体法(布里兹曼法)可制取具有工业价值的大型优质锰锌铁氧体单晶,重量可达数公斤。

它的主要用途是制作高灵敏度、长寿命的磁头和小型化电感器、变压器等。

磁芯

magnetic core

指用金属、磁介质、铁氧体等软磁材料做成的各种形状(如E形、U形、罐形、环形、柱形、螺纹形等)的零件,用于制作各种变压器、电感器等。原线圈中加入磁芯,可

增加电感量和品质因数,可缩小器件体积。

铁氧体天线

ferrite antenna

将线圈绕在软磁铁氧体棒状磁芯上,就称为铁氧体天线或磁性天线。它具有集合空间电磁波磁场的功能和线圈拾取信号的功能。

铁氧体天线尺寸小,适用于小型无线电接收机;水平架设的铁氧体接收天线,在子午平面内有明显的 ∞ 字形方向图,所以接收垂直极化波时有方向性,因此对空间电磁场有较好的抗杂波干扰的能力;它只对磁场有响应,因此对周围除铁磁物质以外的物体有较好的抗干扰性能。它的阻抗随频率的改变而变化,所以属于谐振天线。

铁氧体天线目前在甚低频直至超高频范围内都有应用。

磁性天线

magnetic antenna

即“铁氧体天线”。

磁放大器

magnetic amplifier

铁磁材料的磁通量 ϕ 与磁场强度 H 存在非线性的关系。利用这种特性构成的放大器叫做磁放大器。它有稳定、长寿、过载能力强、抗震、消耗功率小等优点,但响应时间长,使用频率受到限制。

它可用来作稳压器、倍频调制器、无触点继电器等。

三、永磁材料及其应用

永磁材料

permanent magnetic materials

永磁体就是去掉磁化场后仍能对外保持磁场的磁性体。其特点是矫顽力高和磁能积大。

永磁材料又称硬磁材料或恒磁材料。它大致可分为如下三类。

1. 金属永磁材料：如碳钢、钨钢、钴钢、铝钢、铝镍钴、铂钴、稀土钴等。
2. 铁氧体永磁材料：如钡铁氧体、锶铁氧体、铅铁氧体等。
3. 其它类：如复合永磁和半永磁材料等。

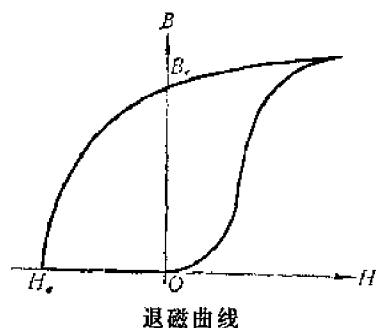
现在使用得最多的是铝镍钴系永磁合金和铁氧体类永磁材料，新兴的稀土钴类永磁合金则是很有前途的永磁材料。

永磁体的应用极为广泛，如无线电工业中的电声器件（扬声器、话筒等），超高频器件（磁控管、行波管、环行器、隔离器等）中的磁体，以及电表和微型电机用的磁体等。

退磁曲线

demagnetization curve

是磁滞回线（一般指饱和磁滞回线）在第二象限的那一部分，如图中的曲线的 $B_r \sim H_c$ 段。它是鉴定永磁体材料品质优劣的一项重要依据。



磁能积

magnetic energy product

在永磁体退磁曲线上任意点的磁感应强度和磁场强度的乘积称磁能积 BH 。

对于单位体积永磁体，在它产生的外磁场中存储的能量为 $\frac{BH}{2}$ 焦耳/米³（在 CGSM

单位制中为 $\frac{BH}{8\pi}$ 高·奥）。

最大磁能积

maximum magnetic energy product

在永磁体退磁曲线上获得的磁能积的最大值称最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。它是表征永磁材料磁性能的一个重要参数，一般希望越大越好。在设计磁路时应使工作点尽可能与 $(BH)_{max}$ 一致。

凸出系数

fullness factor

凸出系数 r 是用来描述退磁曲线形状的一个系数，它等于最大磁能积与剩磁和矫顽力乘积之比值，即 $r = (BH)_{max} / B_r \cdot H_c$ 。

回复状态

recoil state

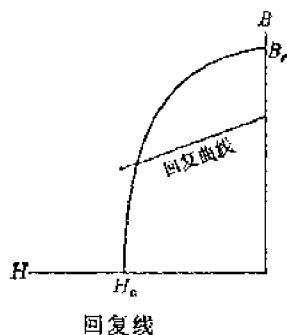
当永磁体的内磁场减小（例如减小磁路的磁阻或降低外界退磁场）时，磁体所达到的状态。

回复线

recoil line

是永磁体在回复状态时往复的局部磁滞回线或其一部分，见图示。或称回复曲线。

在第二象限中，回复曲线与直线稍有不同，但通常近似地把它看作直线，它是从退磁曲线上一点向 B 轴延伸的线。

**回复磁导率**

recoil permeability

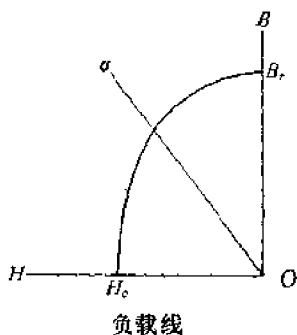
回复磁导率 μ_{re} 等于回复线的斜率。**工作点**

working point

以永磁体工作时的磁感应强度和磁场强度作为座标的一个点，用来描述磁路中永磁体工作状态。

负载线

load line



是与磁路结构有关，处于第二象限通过座标原点的一根直线，如图中的 oa 直线。

在给定磁路结构的情况下，不同材料永磁体的工作点的轨迹必然处于该直线上。

漏磁系数

magnetic leakage factor

漏磁系数 σ 是总磁通与有用磁通之比。**磁杂散系数**

magnetic stray factor

漏磁通与总磁通之比。

永磁体

permanent magnet

见“永磁材料”。

恒磁材料

permanent magnetic materials

即“永磁材料”。

硬磁材料

hard magnetic materials

即“永磁材料”。

马氏体永磁体

Martensitic steel

这是早期的永磁体，它包括碳钢及改进的钨钢、铬钢、钴钢和铝钢，其中常用的是铝钢。这类材料的永磁性来源，是在高温下稳定的奥氏体在淬火过程中转变为强磁马氏

常用马氏体永磁体性能

分 类	化 学 成 分 ① (%)						B_r	BH_c	$(BH)_{max}$	热处理方法
	C	Mn	Cr	W	Co	Al	韦伯/米 ² (高斯)	千安/米 (奥斯特)	千焦耳/米 ³ (兆高·奥)	
碳 钢	0.65	0.85					1.00 (10000)	3.34 (42)	1.4 (0.18)	785℃水淬
碳 钢	1.00	0.50					0.9 (9000)	4.05 (51)	1.5 (0.20)	785℃水淬
铬 钢	1.00	0.50	3.5				0.95 (9500)	5.15 (65)	2.4 (0.30)	825℃油淬
钨 钢	0.70	0.50	0.50	6.00			0.95 (9500)	6.85 (74)	2.6 (0.33)	825℃油淬
钴 钢	0.70	0.35	2.50	8.25	17.00		0.95 (9500)	13.5 (170)	5.2 (0.65)	945℃油淬
铝 钢	0.80	0.55	5.75	3.75	36.00		0.95 (9500)	18.3 (230)	7.1 (0.9)	925℃油淬
铝 钢	2.0					8.0		15.8 (200)	4.0 (0.5)	

① 余为铁的含量。

体。这种组织转变能产生很大的内应力，因而急剧增加合金的矫顽力。再经回火，使马氏体出现弥散分布状态，进一步提高了磁性能。它的磁性能较差（见表），磁能积 $(BH)_{\max}$ 一般在 8.0 千焦耳/米³（ 1.0 兆高·奥）以下，但机加工性能较好，所以有时还有应用。

脱溶硬化型永磁体

precipitation hardening type magnet

它是指铁镍铝为基的永磁合金，经过适当的热处理后，其组织结构由单一的过饱和固溶体脱溶成二相（即弱磁性相和强磁性相）。由于二相之间有着很大的磁饱和差以及高弥散的分布，因而具有高的矫顽力。

这类永磁体在其发展过程中，由于不同元素的加入，大致可分铝镍型、铝镍钴型、铝镍钴钛型。至于其它一些微量附加元素的加入，是为了进一步提高磁性能和改进制造工艺。采用磁场热处理和晶体定向可进一步提高磁体磁性能。

铝镍型永磁体

Al-Ni-Fe permanent magnet

这种磁体由于不加钴，所以相对的价格较便宜，另外制造工艺较简单，但磁性能较低，一般用作仪表磁体。

铝镍钴型永磁体

Al-Ni-Co-Fe permanent magnet

它是在铝镍型永磁体的成份基础上加入

适量的钴。按制造工艺的不同可分为：在磁场中热处理的称为各向异性永磁体；在铸造中使晶体定向的称为柱晶永磁体。

这种永磁体应用很广，制造工艺成熟。它具有良好的磁特性和热稳定性。目前大都用于行波管、磁控管、返波管等电真空器件和小型的电声器件中。它的弱点是矫顽力较低，使用时要注意外场及另外铁磁物质的干扰。

铝镍钴钛型永磁体

Al-Ni-Co-Ti-Fe permanent magnet

这种永磁体在铝镍钴型永磁材料成份基础上提高钴含量和增加钛元素，进一步提高了矫顽力。它的主要用途是电真空器件的周期聚焦磁场，内磁式电表，发电机转子等。

可加工永磁体

machinable permanent magnet

指可机械加工的永磁体，主要类型见表。其中铁铬钴是最近发展起来的一种引人注目的永磁体，它可以轧制和拉拔，目前最高水平已达 $(BH)_{\max} \geq 7$ 兆高·奥。

可加工永磁体一般可锻造、热轧、冷轧、冷拔、切削、冲压和弯曲等，因此可以根据需要加工成片材、丝材以及其它形状。而铝镍钴系、铁氧体和稀土钴永磁体，其共同的缺点是脆性大，只能研磨或电火花加工，而不能进行一般的机械加工。

可加工永磁合金的成分和性能

合金名称	铜 镍 铁			铜 镍 钴			铁 钴 钒 (维加格)				铁 铬 钴		
化 学 成 分	Cu	Ni	Fe	Cu	Ni	Co	Fe	Co	V		Fe	Cr	Co
	60	20	20	50	21	29	I 38.5 II 34	52	9.5 14		45	30	25
剩 磁 B_r (高斯)	5400			3400			10000				9000~12000		
矫 顽 力 BH_c (奥斯特)	550			660			450				500~1100		
磁 能 积 $(BH)_{\max}$ (兆高·奥)	1.5			0.8			3.00				7		
加 工 方 法	铸造—退火—强烈冷加工—时效			铸造—退火—强烈冷加工—时效			铸造—油淬—轧制—时效				铸造—锻造—热轧—酸洗—冷轧—热处理		

稀土钴永磁体

rare earth-cobalt permanent magnet

是由稀土元素和钴元素形成的一种金属间化合物,一般表示为 RCo_5 (R代表稀土元素)。这是一种新型的永磁材料。 RCo_5 属于 CaCu_5 型六角晶系结构。有高的结晶各向异性。

目前在工艺上大多采用粉末法和铸造法。在粉末法中采用磁场成型、静水压和液相烧结等工艺。主要性能见附表。

稀土钴永磁材料的主要性能

材 料	B_r (高斯)	H_c (奥斯特)	$(BH)_{\max}$ (兆高·奥)	工 艺
SmCo_5	9800~ 10000	8700~ 9900	20~24.6	液相烧结
$(\text{SmPr})\text{Co}_5$	9900~ 10300	7600~ 10100	23~26	液相烧结
PrCo_5	9400~ 9600	8400~ 9000	21~22	液相烧结
$(\text{MMSm})\text{Co}_5$	8970	7600	20	液相烧结
$\text{SmCe}(\text{CoCuFe})_5$	7070	5000	12.3	铸造法
$\text{Ce}(\text{CoCuFe})_5$	6330	5200	9.8	铸造法

这类材料的特点是具有极高的矫顽力和磁能积,是目前性能最高的一种永磁体。这对器件的小型化很有利;它的可逆磁导率接近于1,因而抗退磁性强;它的温度系数为 $-0.04\%/^{\circ}\text{C}$ 。

此外,化学式为 R_2Co_{17} 的材料,则具有高磁感应强度和高的居里点。用铁、铜取代部分钴,已制成性能较高的样品。

稀土钴永磁材料主要为行波管、返波管、磁控管等电真空器件和环行器、隔离器等器件提供磁场。另外,在微电机、磁性轴承、电子手表等方面都被广泛应用。

伸长单畴微粒永磁体

elongated single domain (ESD) magnet

针状铁磁金属颗粒(铁、钴)小于某一临界尺寸时,每一颗粒只包含一个磁畴,将此种颗粒粉末定向压制得到的永磁体,一般称为伸长单畴微粒永磁体。由于它具有高的饱和磁感应强度和高的形状各向异性,所以

其磁能积理论值很高。但因工艺困难,目前最大磁能积只达4兆高·奥,尚未得到实际应用。

超细铁粉是用纯铁加某些附加物制成的伸长单畴微粒永磁体。

铂钴永磁体

Pt-Co permanent magnet

化学式为 PtCo ,是一种有序格子型合金,其磁性与有序-无序转变有很大关系。这种材料的可加工性和磁性均优于铝镍钴永磁体,缺点是原材料稀有。

这种材料可用于制作形状复杂、耐腐蚀、尺寸小的永磁器件,并适用于功率大的场合。

铂钴永磁材料的磁性能

	B_r (高斯)	BH_c (奥斯特)	$(BH)_{\max}$ (兆高·奥)
一般水平	6450	4450	9.5
较高水平	8300	4900	15.0

锰铋永磁体

Mn-Bi permanent magnet

它是由非磁性金属锰、铋粉末经烧结压型或熔化而制成的一种金属间化合物。它不含较贵的镍、钴金属,价格便宜,在科学研究上有价值。缺点是工艺复杂,容易被氧化。目前最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 达7.3兆高·奥。

铁氧体永磁体

ferrite permanent magnet

铁氧体永磁材料的化学式为 $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$ (式中M为锶、铅、钡中的一种或多种),其结构为磁铅石型。制造工艺与陶瓷工艺相似。

铁氧体永磁材料的磁性能

材 料	B_r (高斯)	BH_c (奥斯特)	$(BH)_{\max}$ (兆高·奥)
各向同性钡铁氧体	2200	1800	1.0
各向异性钡铁氧体	4000~4300	1700~2200	3.0~4.0
各向异性高 B_r 锶铁氧体	4100~4500	1900~2000	3.8~4.5
各向异性高 H_c 锶铁氧体	3500~4000	3000~3300	3.0~3.5

由于它的各向异性大,所以矫顽力较高,电阻率高,加之原料价格低廉,因此是目前工业上大量生产的永磁体之一。但温度系数较高 ($0.2\%/^{\circ}\text{C}$)。

这种材料主要用于制作扬声器、磁选仪、行波管和直流电机、小型发电机的磁体。

复合永磁体

composite permanent magnet

它是将永磁粉末和其它材料(如合成橡胶、塑料、低熔点金属等有关物质)混合制成的一种永磁材料。目前复合永磁材料有铁钴微细粉末,永磁铁氧体粉末,铝镍钴永磁粉末,稀土钴永磁粉末。

它具有综合特性,可制成高精度、易加工、可挠性的永磁体。

这种永磁材料主要用途是转速表、电流表、曝光表、微电机、密封圈、阴极射线管等。

半永磁材料的性能和用途

材 料	成 分	H_c (奥斯特)	B_r (千高斯)	矩 形 比	用 途
铁 钴 钒	V2~5Co49余为Fe	20~60	21.5~16.0	0.9~0.95	铁氧继电器
碳 钢	C0.5, Fe	14	14.5		锁式继电器
Fe-Ni-Cu 合金	Ni18, Cu6, Fe	60~75	13.0~11.0	0.95	小型锁式继电器
ViC alloy	Fe-Co-V (Cr)	60~230	16~13		磁滞电机
Co-Fe-Ti 合金	Co85Fe12Ti3	12.6	15	0.9	半固定存储器

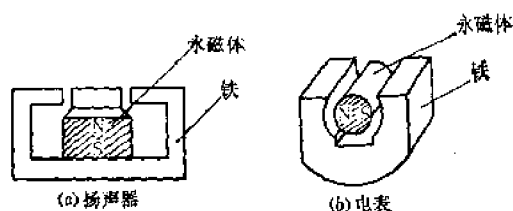
充磁

magnetizing

永磁体在外磁场中磁化称充磁。充磁所需要的外磁场强度至少应达到被磁化永磁体矫顽力的3至5倍。

内磁式磁路

internal magnetic circuit



内磁式磁路

复合永磁材料的性能

材 料	制 法	B_r (高斯)	$B H_c$ (奥斯特)	$(BH)_{max}$ (兆高·奥)	密 度 (克/厘米 ³)
永磁铁氧体-合成橡胶	挤压	2100	1700	0.9	3.9
铸AlNiCo-塑料	压制	4000	800	1.1	5.2
(Fe-Co)-Pb	磁场中压制	6250	1140	3.4	9.6
稀土钴粉-聚氯乙炔树脂	混合成型			5~9	

半永磁材料

semi-hard magnetic materials

指矫顽力为几十到300奥斯特左右,磁滞回线的面积较大,磁性介于软磁和永磁材料之间,但又接近于永磁材料的磁性材料。

这种材料按其磁化机理可以分为四类:淬火硬化钢; α/γ 相变合金;析出硬化合金;单畴粒子弥散合金。

多数半永磁材料,具有良好的塑性,可进行锻轧、拉丝、冲压等加工。

一种磁回路形式,永磁体位于气隙的内缘,如扬声器磁路和内磁式电表磁路,见图。

内磁式磁路漏磁小,因此效率要比外磁式磁路高。

外磁式磁路

external magnetic circuit

一种磁回路形式,永磁体位于气隙的外缘,如外磁式扬声器磁路,见图。



外磁式磁路

四、磁记录材料

磁记录技术

magnetic recording technique

这是一种利用磁性物质作记录、存储和再生信息的技术。它包括录音、录像和录码,前二者为连续记录,后者是分立记录。

与其它各种记录技术相比,它的主要优点是:频率范围宽,从直流到十几兆赫,覆盖了整个音频和视频范围;信息密度高,容量大,例如,一个磁盘可存储几百万位信息;动态范围大,在超过 40 分贝的范围可进行精确线性的记录;信息可长期保存,直接再生,反复再生,必要时可擦去其它信息,因而成本低;固有失真小;寿命长。

磁记录系统的主要组成部份是磁头组件、磁带(或磁盘)及其传动装置、记录放大器、再生放大器以及伺服系统。有关磁记录部件及其功能见本《词典》第二十九章电声。

磁记录技术正日益广泛地应用于广播、电视、电影、传真、计测、自控和遥控、复制、印刷、卫生、教学等方面。目前还在研究磁全息记录技术。

磁头材料

magnetic head materials

磁头材料是高密度软磁材料。对它的一般性要求是:最大磁导率和起始磁导率高,饱和磁化强度大,矫顽力小,剩余磁化强度低,磁导率的截止频率高,电阻率大,耐磨损,机械加工性好。此外,对不同的用途,要求还有所侧重。

磁头材料有金属和铁氧体两大类。

金属磁头材料,有坡莫合金、铁铝合金、

铝硅铁合金等。它的优点是磁导率和饱和磁化强度高,矫顽力低,较铁氧体柔软。缺点是电阻率低,硬度较小,寿命较短,一般不宜在高频下使用。目前,录音、录码和电子计算机用的磁头材料多数还是坡莫合金。

目前常用的铁氧体磁头材料,有一般烧结的高密度锰锌和镍锌铁氧体、热压的高密度镍锌和锰锌铁氧体、单晶锰锌铁氧体和单晶六角型铁氧体。铁氧体磁头材料的最主要优点是硬度大,寿命长,以及电阻率高;因而使用频率高于金属材料,例如六角晶系材料做成的磁头可用于几兆赫。

磁记录介质

magnetic recording media

涂敷在磁带、磁盘和磁鼓上面的用于记录和存储信息的磁性材料。

对它的一般要求是:矫顽力比较高(200~1000 奥斯特左右),饱和磁化强度大,矩形比高,磁滞回线陡直,温度系数小,老化效应小。总之,要求矩形性好的永磁材料。

常用的磁记录介质有氧化物和金属两类。氧化物中主要有针状 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4 、 CrO_2 ,其中以 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 应用最广泛,六角晶系铁氧体材料用作高频磁记录介质也很有希望。

金属磁记录介质有铁、钴、镍的合金粉末和用电镀、化学或蒸发方法制成的磁性合金薄膜。合金粉末具有高灵敏度和高分辨率的优点,但存在氧化问题。合金薄膜可以做得很薄,故分辨率高;但膜面强度、耐磨性及化学稳定性存在一些问题,因而应用受到一定限制。

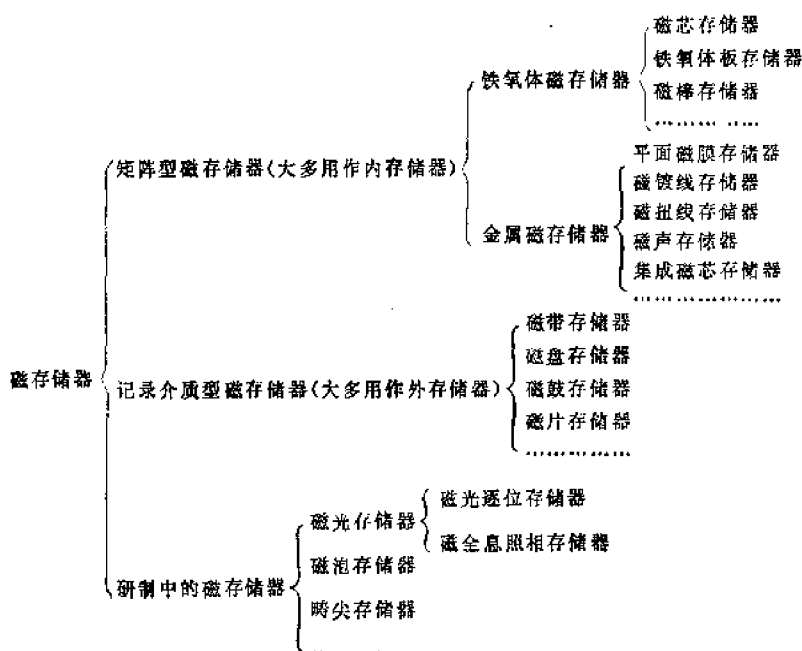
五、磁存储材料与器件

磁存储器

magnetic memory

用磁性材料作为存储元件的存储器叫磁存储器，例如，磁芯存储器、磁膜存储器、

磁记录型存储器等。它是目前电子计算机中采用最多、使用最广的一类存储器。大体分类如表。



存储(记忆)元件

memory element

能够存储和识别信息的元件称为存储元件。一般地说，凡具有易于识别两种(或两种以上)稳定物理状态的材料都可用于制作存储元件。它是电子计算机存储器的主要组成部分，也是决定计算机性能指标的主要因素之一。

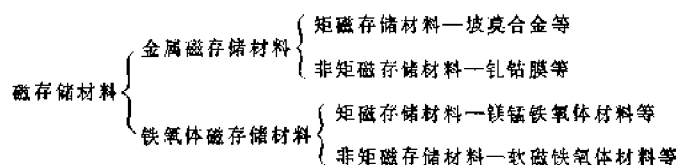
存储元件分为磁性存储元件和非磁性存储元件。磁性存储元件(如环形磁芯、平面磁膜、镀线磁膜、磁泡和磁光存储器等)是

用矩磁性材料或非矩磁性材料制成的。非磁性存储元件有双极型半导体、金属氧化物半导体等。

磁存储材料

magnetic memory materials

凡能用来制造存储(记忆)元件的磁性材料均称为磁存储材料。这种材料按组成分为金属磁存储材料和铁氧体磁存储材料;按其特性分为矩磁存储材料和非矩磁存储材料。目前,磁存储材料是制造计算机存储元件应用最多的一种材料。



矩磁材料

rectangular hysteresis materials

具有矩形磁滞回线（即形状接近矩形的磁滞回线。一般指剩磁感应强度与最大磁感应强度之比大于 0.8 的磁滞回线。它分自发矩形磁滞回线和诱发矩形磁滞回线）而且矫顽力较小的磁性材料称为矩磁材料。

由于这类材料具有近于矩形的磁滞回线，因而磁化后剩磁感应强度较大（接近于磁化时的最大磁感应强度），而且根据磁化场的方向不同，可以得到两种不同的稳定剩磁状态。若再受一定方向和大小的磁场作用时，根据磁通量改变所引起的感应电压的大小就可以判断它原来是处在正还是负的剩磁状态。利用矩磁材料这种易于存储又便于识别两种物理状态的性质，便可作成存储元件、开关元件和逻辑元件等。因此，目前矩磁材料在电子计算机、自动控制和遥控遥测等科学技术领域中有着广泛和重要的应用。

矩磁材料包括铁氧体矩磁材料和金属矩磁材料。

自发矩形磁滞回线

spontaneous rectangular hysteresis loop

有些磁性材料在加热到居里温度以上再冷却下来时，其磁滞回线仍为矩形，具有这种性质的磁滞回线称为自发矩形磁滞回线。这种材料称为自发矩磁材料。

诱发矩形磁滞回线

induced rectangular hysteresis loop

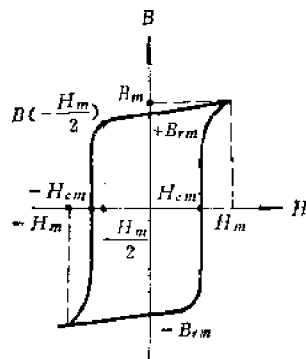
有些磁性材料的矩形磁滞回线需经过特殊处理（如磁场处理、磁热处理、胁强处理以及轧制等）才能得到。具有这种性质的磁滞回线称为诱发矩形磁滞回线。这种材料称

为诱发矩磁材料。大多数这种材料加热到居里温度以上再冷却下来时，其磁滞回线不再是矩形。

最大磁场强度

maximum magnetic field strength

测量磁芯正常磁滞回线时所用的最大磁场称最大磁场强度 H_m （单位为安/米或奥斯特）。测量存储磁芯的静态参数时，它一般取值为矫顽力的 3~5 倍。



最大磁场强度 H_m 的定义图解

最大磁感应强度

maximum magnetic induction

在最大磁场强度 H_m 作用下，磁性材料达到的最大磁感应强度 B_m （单位为特斯拉或高斯）。

剩磁比

remanence ratio

表征开关磁芯磁滞回线矩形程度的重要参数，或称开关矩形比。它是剩余磁感应强度 B_{rm} 与最大磁感应强度 B_m 之比，即 $R_r = B_{rm}/B_m$ 。对开关磁芯而言， R_r 愈大愈好，一般 R_r 值应为 0.90~0.97 左右。

开关矩形比

switching squareness ratio

即“剩磁比”。

矩形比

squareness ratio

表征记忆磁芯磁滞回线矩形程度的重要参数,或称记忆矩形比。它是在 $-\frac{H_m}{2}$ 时的磁感应强度 $B(-\frac{H_m}{2})$ 与最大磁感应强度之比,即 $R_s = B(-\frac{H_m}{2})/B_m$ 。对于记忆磁芯而言,不仅要求剩磁比 R_s 大,而且要求矩形比 R_r 大,一般 R_s 值应为0.75~0.90左右。

记忆矩形比

memory squareness ratio

即“矩形比”。

剩磁磁导率

remanence permeability

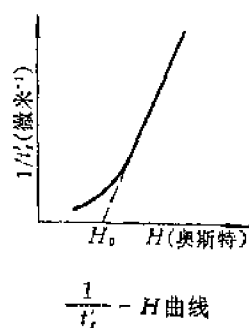
在剩磁点 B_r 上的可逆磁导率称剩磁磁导率 μ_{rm} 。用作记忆元件的磁性材料的 μ_{rm} 要小。

开关系数

switching coefficient

开关系数 S_w 是表征反磁化速度的重要参数,是材料固有的物理特性。在一定磁场范围内,开关系数是常数,可用 $\frac{1}{t_s} - H$ 曲线上直线线段的斜率的倒数表示,即 $S_w = t_s'(H_m - H_0)$,单位为微秒·奥斯特,如图所示。 S_w 愈小,则 t_s' 愈小,计算机的运算速度就愈快。

其中 t_s' 为 rV_1 (干扰“1”的感应电压)前沿10%峰值点至后沿10%峰值点的时间间隔, H_0 为临界磁场(见“感应电压脉冲特性”)。

**临界磁场**

threshold field

临界磁场 H_0 是磁芯反磁化场的最低极限值,它由 $\frac{1}{t_s} - H$ 曲线的直线部分延线在 H 轴上的截距来确定,一般近似等于材料的矫顽场强 H_{cm} 的数值。

根据 H_0 的大小可以确定反磁化磁场的大小, H_0 愈大反磁化磁场也愈大。

矩磁铁氧体材料

rectangular loop ferrite materials

具有矩形磁滞回线且矫顽力较小的铁氧体材料,称矩磁铁氧体材料。

这种材料具有电阻率高、抗辐射性强、信息无易失性、制造工艺简单、成本低等优点。缺点是磁感应强度小,温度稳定性比矩磁金属材料稍差。常用的矩磁铁氧体材料主要有两大类,一类是常温矩磁铁氧体材料,如锰-镁(Mn-Mg)系,锰-锌(Mn-Zn)系,铜-锰(Cu-Mn)系,镉-锰(Cd-Mn)系等;另一类是宽温矩磁铁氧体材料,如锂(Li)系和镍(Ni)系等。目前大量使用的矩磁铁氧体材料,主要是锰-镁系和锂系材料。

矩磁铁氧体材料

铁氧体系列	改进性能	使用特点	居里温度(℃)
锰-镁系加锌	使 H_c 降低, B_r 升高, t_s (开关时间)减小	低驱动电流,高速度	280~300℃
锰-镁系加镍、铜	使 B_r 降低	高速大容量	
锰-镁系加镉	使 H_c 降低	低驱动电流	
锰-镁系加钨	使 H_c 升高(有异相存在)	高速度、高驱动电流	
镍系加锌	使 H_c 降低, t_s 减小	中速度中电流	550~590℃
镍系加钨	使 R_s 升高, t_s 减小	中速度中电流	
锂系	高居里温度	宽温	590~690℃
锂镍锌系	锂系的改进, t_s 减小	宽温,高速度	
锂锰锌系	锂系的改进, t_s 减小, B_r 升高	宽温,高速度	

环形存储(记忆)磁芯

toroidal memory core

结构形状为环形的铁氧体磁芯,称为环形存储磁芯。

由于这种磁芯具有制造工艺简单、可靠性高、抗辐射性较强、信息无易失性、测试方便等优点,因而是目前电子计算机中用得最多的存储元件。

这种磁芯按工作温度范围可分为常温存储磁芯($20\sim 40^{\circ}\text{C}$);中温存储磁芯($0\sim 75^{\circ}\text{C}$)和宽温存储磁芯($-25\sim +125^{\circ}\text{C}$)。按其工作电流可分为小电流存储磁芯(300毫安以下),中电流存储磁芯(500毫安左右)和大电流存储磁芯(750毫安以上)。目前所用的磁芯,外径在0.3~1.2毫米左右。

测试磁芯的电流脉冲序列

train of the current pulse for testing core

测试记忆磁芯时所用的一个电流脉冲组。

如图1所示,读电流脉冲 I_r 使磁芯处于 $-B_r$ 剩磁状态,记做“0”;写电流脉冲 I_w 使磁芯处于 $+B_r$ 剩磁状态,记做“1”。由于磁芯所处的剩磁状态不同,且在读电流脉冲的作用下,读出线上将感应出不同的电压信号。计算机就是利用这一特点来进行信息的存储和识别的。

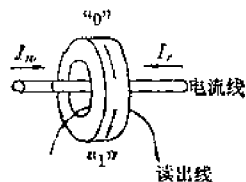


图1 磁芯存取信息示意图

由于计算机中的磁芯实际上总是受到各种干扰脉冲的干扰,为了模拟计算机上的使用,须采用一系列包含有干扰脉冲的脉冲组来进行磁芯的挑选。

图2给出了一种常用的脉冲序列的原理图。

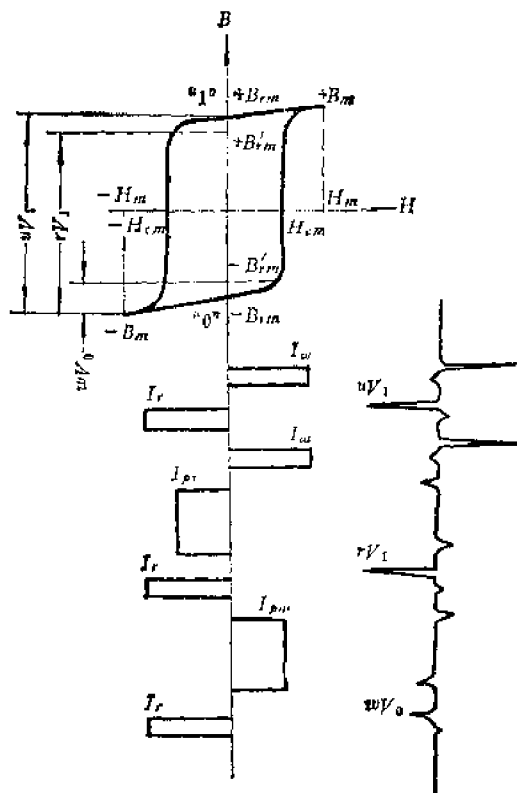


图2 测试磁芯的常用脉冲序列

I_r —读电流脉冲幅度。

I_w —写电流脉冲幅度。写电流脉冲与读电流脉冲极性相反。

I_m —驱动电流脉冲幅度(全选电流脉冲幅度)。它表示当 $I_r = I_w$ 时的读写电流脉冲幅度。

I_{pw} —写向干扰电流脉冲幅度。

I_{pr} —读向干扰电流脉冲幅度。

I_p —半选干扰电流脉冲幅度。它表示当 $I_{pw} = I_{pr}$ 时的干扰电流脉冲幅度。

δ —干扰比,它是 I_p 与 I_m 之比,即 $\delta = I_p / I_m$ 。对于电流重合法应用的磁芯,它一般取值为0.55~0.61。

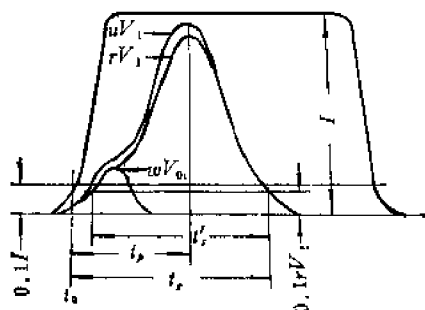
其中 I_{pr} 和 I_{pw} 可以是一个宽脉冲(20~30微秒),也可以是多个(一般为16个以上)窄脉冲。

uV_1 、 rV_1 、 wV_0 见“感应电压脉冲特性”。

感应电压脉冲特性

response voltage pulse characteristic

指磁芯在读写和干扰电流脉冲作用下的输出感应电压特性(见图)。由于磁芯所处的原始状态不同,经同一个读电流脉冲的作用将得到不同的感应信号,利用这一特性可以很好地鉴别磁芯所存储的信息。



感应电压脉冲特性

uV_1 —无干扰“1”感应电压(读“1”感应电压)。处于“1”状态的磁芯经读电流脉冲作用得到的感应电压,相应于从 $+B_{rm}$ 到 $-B_m$ 的磁通变化。单位为毫伏。

rV_1 —干扰“1”感应电压(读破坏“1”感应电压)。处于“1”状态的磁芯,经写向干扰后在读电流脉冲作用下得到的感应电压,相应于从 $+B'_{rm}$ 到 $-B_m$ 的磁通变化。单位为毫伏。

wV_0 —干扰“0”感应电压(读破坏“0”感应电压)。处于“0”状态的磁芯,经写向干扰后,在读电流脉冲作用下得到的感应电压,它相应于从 $-B'_{rm}$ 到 $-B_m$ 的磁通变化。一般 wV_0 愈小愈好。单位为毫伏。

t_p —峰值时间。它是时间起点 t_0 到感应电压 rV_1 达到峰值时的时间间隔。同一块板的磁芯要求 t_p 尽量一致。单位为毫微秒或微秒。

t_s —开关时间。它是时间起点 t_0 到感应电压 rV_1 下降到它的峰值的10%时的时间间隔。单位为毫微秒(ns)或微秒(μs)。开关时间愈短,计算机运算速度愈快。

t_d —是开关时间的另一种命名法,它是 rV_1 前沿10%峰值点到后沿10%峰值点的时间间隔。以往采用这种命名法,现在采用 t_s 的命名法。

K —信号干扰比。是 rV_1 与 wV_0 之比。它的大小表征了磁芯抗干扰的能力, K 值愈大,“1”和“0”信号愈易辨别,从而提高计算机的可靠性。目前生产的存储磁芯在干扰比为0.6时, K 值可达到5~10左右。

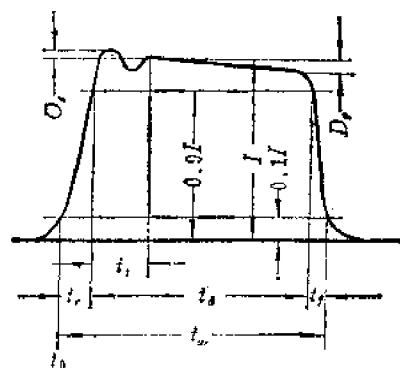
K' —抗干扰比。是 rV_1 与 uV_1 之比。 K' 值愈大磁芯抗干扰能力愈强。一般要求 K' 值为0.9以上。

电流脉冲的主要特性

current pulse basic characteristic

指与测试存储磁芯动态性能有关的电流脉冲的一些参数(见图)。

磁芯的脉冲(动态)特性与测试电流脉冲的参数有密切关系。尺寸不同,工作电流不同,所要求电流脉冲参数也不同。如一种外径为0.8毫米的存储磁芯,要求工作电流为800毫安,上升时间为0.1微秒,脉冲宽度为2微秒,过冲顶降小于2%等。



电流脉冲的主要特性

I —脉冲幅度。单位为毫安。

t_r —脉冲上升时间。单位为微秒(μs)或毫微秒(ns)。

t_f —脉冲下降时间。单位为微秒或毫微秒。

t_d —脉冲顶宽。单位为微秒或毫微秒。

t_w —脉冲底宽。单位为微秒或毫微秒。

O_s —过冲。用 O_s 对 I 的百分比表示。

D_v —顶降。用 D_v 对 I 的百分比表示。

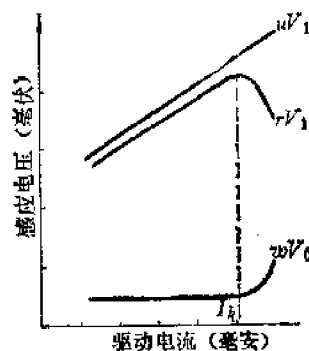
t_r —脉冲前沿瞬变过程(过冲,脉动等)。

t_0 —时间起点。

最大K值电流

maximum K value current

最大 K 值电流 I_K ,是在一定的干扰比下,获得最大信号干扰比的驱动电流脉冲幅度。它一般大于磁芯的工作电流脉冲幅度。单位为毫安。

最大 K 值电流 I_K 定义图解

拐点电流

knee current

在一定的干扰比下,与最大 K 值电流 I_K 相对应的写向干扰电流脉冲幅度。它等于最大 K 值电流同干扰比的乘积。单位为毫安。

极限干扰电流

limiting disturb current

在驱动电流给定的情况下,使干扰“1”感应电压 rV_1 与无干扰“1”感应电压 uV_1 峰值之差或比达到指定值时的读向干扰电流脉冲幅度称极限干扰电流 I_{do} 。一般极限干扰电流愈大,表示磁芯抗干扰的能力愈强,磁芯的性能愈好。其单位为毫安。

破坏电流

break current

在驱动电流给定的情况下,使干扰“0”感应电压 wV_0 在无干扰“1”感应电压峰值时刻达到一个指定值的写向干扰电流脉冲幅度称破坏电流 I_b 。单位为毫安。

破坏比

break ratio

破坏电流脉冲幅度与驱动电流脉冲幅度之比,即 $\delta_b = I_b/I_m$ 。

驱动比

drive ratio

在线选法工作的存储器中,测量磁芯所用的读写电流脉冲幅度不同,为表示其不同的程度采用驱动比表示。其定义为:读电流脉冲幅度与写电流脉冲幅度之比,即 I_r/I_w 。

无干扰“1”感应电压的温度系数temperature coefficient of uV_1

驱动电流一定时,磁芯的无干扰“1”感应电压 (uV_1) 大小会随温度改变而变化。通常,温度升高 uV_1 变大。每升高 1°C 时 uV_1 的相对变化量 α_v ,称为 uV_1 的温度系数,它的表示式为

$$\alpha_v = \frac{(uV_1)_2 - (uV_1)_1}{\frac{1}{2}[(uV_1)_2 + (uV_1)_1](\theta_2 - \theta_1)} \times 100(\%/^\circ\text{C})$$

式中 θ_1 、 θ_2 表示温度,且 $\theta_2 > \theta_1$; $(uV_1)_1$ 、 $(uV_1)_2$ 为在 θ_1 、 θ_2 所测得的 uV_1 。

有时,也用 uV_1 的每度绝对变化量 α'_v 来

表示,其表示式为

$$\alpha'_v = \frac{(uV_1)_2 - (uV_1)_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{毫伏}/^\circ\text{C})$$

α_v 或 α'_v 愈小,磁芯的温度特性愈好。

驱动电流温度系数

temperature coefficient of drive current

无干扰“1”感应电压保持一定时,磁芯的驱动电流 I_m 也随温度改变而变化。通常温度升高, I_m 变小。每升高 1°C 时 I_m 的相对变化 α_I 称为驱动电流的温度系数,它的表示式为

$$\alpha_I = \frac{I_2 - I_1}{\frac{1}{2}(I_1 + I_2)(\theta_2 - \theta_1)} \times 100(\%/^\circ\text{C})$$

式中 θ_2 、 θ_1 表示温度,且 $\theta_2 > \theta_1$; I_1 、 I_2 为在 θ_1 、 θ_2 测得的驱动电流脉冲幅度。

有时也用 I_m 的每度绝对变化来表示,其表示式为

$$\alpha'_I = \frac{I_2 - I_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (\text{毫安}/^\circ\text{C})$$

它同 α_v 和 α'_v 一样,都是表征磁芯温度特性的重要参数。 α_I 或 α'_I 愈小,磁芯温度特性愈好。

磁芯存储板

magnetic core plane

在磁芯存储器中,按照一定工作方式编成的磁芯平面矩阵称为磁芯(存储)板。对于重合法存储器而言,目前常用的磁芯板的容量有 4096 (64×64) 字, 8192 (128×64) 字, 16384 (128×128) 字等。

将磁芯板按照一定顺序排列组装起来的整体,称为磁芯(存储)体。磁芯体的大小由磁芯板的容量和存储器的位数来决定。

 Δ 噪声

delta noise

由于干扰感应电压不平衡,在存储矩阵中所产生的总的干扰感应电压称为 Δ 噪声 V_δ 。单位为毫伏。

开关磁芯

switching core

由矩磁铁氧体材料制成, 用于在开关系统中执行“开”、“关”功能的环形磁芯或多孔磁芯。目前广泛应用于自动控制系统和遥控遥测系统。

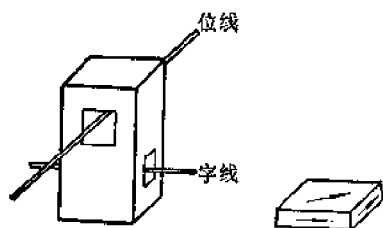
双轴磁芯

biax (magnetic)
core

双轴存储磁芯是用于半固定存储器的一种高速铁氧体存储元件。它具有两个轴线互相垂直但又互不相通的圆孔

(或方孔), 如图示。大孔叫存储孔, 存储孔内穿位线; 小孔叫访问孔, 访问孔内穿字线。它是利用两孔之间的隔层部分的磁道干涉进行信息存储的。由于这种干涉是可逆的, 因而读出时所存信息不会被破坏。

这种磁芯是用常温或宽温矩磁铁氧体材料制成的。其特点是速度快, 驱动电流低, 组装密度高, 抗干扰能力强, 不破坏读出, 电更换信息速度快而且方便。因此它是半固定存储器较为理想的元件; 但在制造工艺和测试方面应进一步改进。这种磁芯已用于电子计算机半固定存储器。



(a) 双轴磁芯 (b) 孔间隔层内磁通方向

双轴磁芯

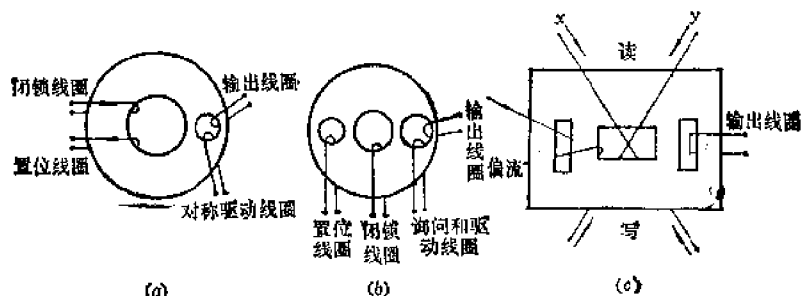
多孔磁芯

multi-aperture core (device), MAD

具有两孔或更多孔的铁氧体磁芯称为多

孔磁芯, 如图示。它是利用磁路之间的磁通变换来完成逻辑、开关和信息存储等功能的, 根据不同的应用目的可分别用矩磁铁氧体材料和软磁铁氧体材料来制造。

这种磁芯的优点是可靠性高, 缺点是速



多孔磁芯的各种结构形式

(a) 双孔磁芯结构; (b) 三孔磁芯结构; (c) 三孔磁芯结构。

度慢, 体积大, 制造工艺复杂, 所以主要是在自动化或成本低的整机上使用。

布线多孔存储板

wired multi-aperture plate for memory

在多孔铁氧体薄片上以光刻工艺进行蒸发布线, 这样布线的多孔铁氧体板具有一定的存储功能, 称为布线多孔存储板。它的优点是密度较高, 体积小, 避免了环形存储磁芯繁杂的布线过程。缺点是存储容量不很大, 因此用作小型控制计算机的存储元件较为合适。

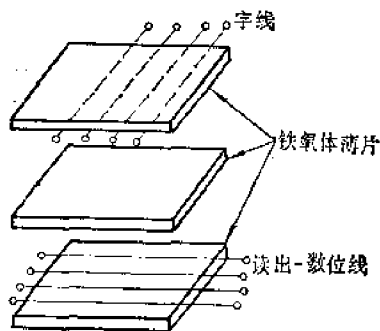
多孔存储板分为固定多孔存储板和操作多孔存储板。固定多孔板是用锰锌或镍锌软磁铁氧体材料制造的, 用于不破坏读出的存储器。操作多孔存储板是用锂锰或镁锰系矩磁铁氧体材料制造的, 用于线选法工作的存储器。

叠片铁氧体存储板

laminated ferrite memory planes

是为了解决存储磁芯穿线和提高存取速度等问题而设计的。它是由布有读出-数位线和字线的三片厚度约 0.15 毫米的铁氧体薄片, 通过加热、加压和高温烧结而制成的。由于它是基于正交场驱动原理工作的, 因而

这种存储板存取速度快。另外还有存储密度高，一次制造，避免了磁芯穿线的繁杂劳动等优点。主要缺点是制作线路难度大，成品率低。



叠片铁氧体存储板示意图

矩磁金属磁性材料

metallic magnetic materials with square loop

具有矩形磁滞回线且矫顽力较小的金属磁性材料，称为矩磁金属磁性材料。

用于电子计算机存储元件的矩磁金属磁性材料主要是坡莫合金。这种材料的特点是矫顽力小，温度系数较低，矩形性较好，剩磁比 R_r 可达0.98。主要缺点是涡流损耗大，对应力敏感，抗辐射和耐腐蚀性较差。

平面磁膜

planar magnetic film

系在磁场中，用真空蒸发或阴极溅射，将铁磁材料（如含铁20%、镍80%的坡莫合金）以一定大小和形状的磁性点，按阵列形式沉积在平坦的玻璃基片（或其它基片）上的磁性薄膜。膜点通常是长方形的（最初是圆形的），尺寸约为1~3毫米，厚度为数百到一千多埃。

平面磁膜的特点是开关速度快，可达1~3毫微秒，温度特性好，可在较宽的温度范围内工作。缺点是输出信号小（仅0.5~1.5毫伏），干扰严重，批量生产成品率低，制备工艺要求严，难以控制膜特性等。

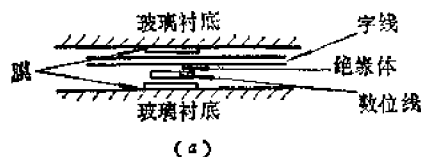
平面磁膜主要用作小型高速控制存储器

和缓冲存储器的存储元件。

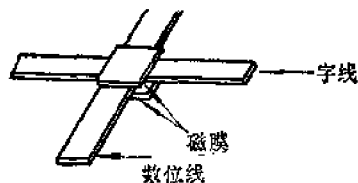
耦合平面磁膜

planar coupled magnetic film

系为增加存储容量，减小退磁场和薄膜点间相互作用，而研制出平面耦合膜。如图所示，它是由各自布有位线和字线的两片平面磁膜紧叠在一起构成的，这两片膜的字线和位线互相正交排列，线间夹有绝缘层。这种膜可以做成高密度、低噪声、适于集成电路驱动的高速存储器。



(a)



(b)

耦合平面磁膜

(a)截面，(b)结构外形。

磁镀线

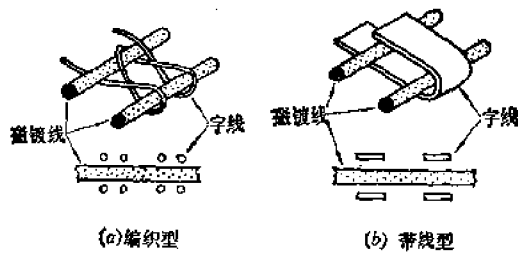
magnetic plated wire

磁镀线（或称磁环线）是在一个直径为0.05或0.125毫米的光滑磷青铜或镀青铜或其它基体上镀一层厚度为100~7000埃（Å）的坡莫合金磁性材料的圆柱型磁存储元件。由于磁性层是各向异性的，即沿圆周方向比轴向易磁化，因此沿圆周两个方向可达到分别存储信息“1”和“0”的目的。

它与平面磁膜相比，信号大，驱动电流小，存取速度稍慢，开关时间为12~15毫微秒，主要用作高速大容量存储器。

根据存储器的工作方式和结构，将磁镀线制成磁镀线存储板。存储板的形式很多，如编织型、平面电缆型、铁氧体保通型和带线型等。目前主要应用的是编织型和带线型

存储板。其结构如图所示。

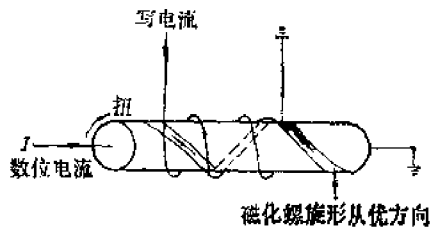


磁镀线存储板结构示意图

磁扭线

twistor

磁扭线是使用具有矩形磁滞回线的金属磁性材料制成的一种存储和控制的磁性元件。它是在一特定的绝缘铜线上，缠绕一条受着扭力并与绝缘铜线轴成 45° 角的坡莫合金带，以及产生轴向磁场的线圈构成的。以后改用镀线制作。其结构如图所示。



磁扭线结构示意图

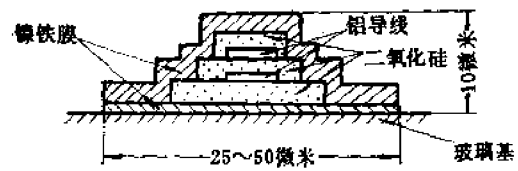
集成磁芯

integrated magnetic core

它是一种工作原理类似于环形存储磁芯，工艺与结构象磁膜的快速存储元件，其结构如图所示。底层的镍铁（或硅铁、钴镍铁）合金磁层是存储层，磁滞回线为矩形。顶层的硅铁（或镍铁、铬镍铁）合金磁层是导磁层。中间为字线和数位线，各层间以二氧化硅（或一氧化硅）层绝缘，采用真空蒸发（或电子束蒸发，或高频溅射）和光刻工艺制成。

这种元件的单元尺寸小（约为 $25 \sim 100$ 微米），存储密度达 $10000 \sim 20000$ 位/厘米²，驱动电流约 50 毫安，开关时间约 100 毫微

秒，输出信号可达 $5 \sim 10$ 毫伏，是一种驱动电流小、开关速度快的存储元件。其缺点是工艺要求严格。



集成磁芯结构示意图

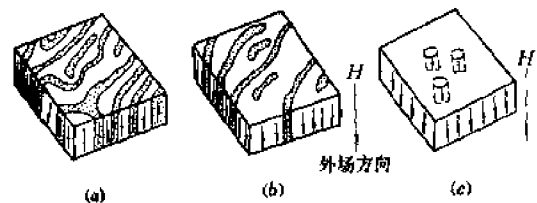
磁泡（畴）

magnetic bubble (domain)

磁泡是一种圆柱形磁畴。在一些很薄的磁性材料中，若无外加磁场，可以观察到很多蜿蜒曲折的条状磁畴，如在垂直于薄片方向加磁化场，这种条状磁畴会收缩，到一定磁场大小时，会缩成圆柱状。这些圆柱形磁畴在材料的表面上表现为圆形，好像水面上浮着一群水泡，在磁场作用下这种圆柱形磁畴可以动来动去，因此把它叫做磁泡，又叫做泡畴。如图所示。

若以磁泡的“有”和“无”来表示“1”和“0”两种信息，则在材料上加以控制电路或磁路，就能做到控制磁泡的产生、消失、传输、分裂，以及磁泡相互作用，从而完成信息的存储、记录和逻辑运算等功能。这就能做成磁泡存储器件。

用磁泡做成的器件，具有存取速度快（ 10^8 位/秒）、存储密度高（ $10^6 \sim 10^8$ 位/厘米²）、体积小、功耗低、结构简单和信息无易失性等特点。缺点是工艺复杂，不稳定。



磁泡形成示意图

a 和 b 分别为 $H = 0$ 时和 H 较小时的蜿蜒条形磁畴，有阴影处磁矩方向向上，其它处磁矩方向向下；c 为圆柱状磁畴，磁矩方向向上。

磁泡(畴)材料

magnetic bubble (domain) materials

某些磁性材料的薄膜(或薄片),具有垂直于膜面的单轴各向异性和一定的饱和磁化强度 $4\pi M_s$ 值,当各向异性场 $H_A \geq 4\pi M_s$ 时,在垂直于膜面的一定外加磁场下可以形成磁泡,这种材料称为磁泡(畴)材料。

已发现的磁泡材料有钙钛石型正铁氧体、磁铅石型铁氧体、石榴石型铁氧体以及非晶态磁泡材料(如钐-钴、钐-铁膜)。由于石榴石型铁氧体泡径小,迁移率高;因此是当前研究最多的一种磁泡材料。钙钛石型正铁氧体迁移率较高,但泡径太大,温度稳定性差。磁铅石型铁氧体泡径很小(0.3微米左右),但迁移率很低。因而对这两类材料目前研究较少。

在磁泡材料研究的初期,用助熔剂法、提拉法等制备块状单晶,通过切磨和抛光的方法制成具有一定方向的单晶薄片来观察磁泡,但用这种方法制备无缺陷的薄片是麻烦的。因此研究了许多直接制备磁泡单晶薄膜的方法,其中有液相外延、气相化学沉淀和高频溅射法等,目前大量采用的是液相外延。

非晶泡(畴)材料

amorphous material for bubble (domain)

这种磁泡材料是非晶结构的,它也具有垂直于膜面的足够高的单轴各向异性。它可用高频溅射、真空蒸发和直流溅射等方法来制备。钐-钴(Gd-Co)系的饱和磁化强度是成分的函数,调节成分即可获得合适的磁泡材料。它具有制备工艺简单、成本低、泡径小(在1微米以下)、迁移率高(1000厘米/奥斯特·秒以上)等优点。因而颇受重视。

泡径

bubble diameter

磁泡处于稳定状态时的直径 d_b 。它的大小与材料特性、外加磁场有关。泡径愈小,

存储密度愈高。

最佳工作泡径

optimal operating bubble diameter

它是最佳膜厚($h=4l$)的膜所对应的破灭泡径的两倍。可用 $d_{opt}=8l=\frac{8\sigma_w}{4\pi M_s^2}$ 来表示。式中, σ_w 为畴壁能密度, M_s 为饱和磁化强度。一般都最佳工作泡径和最佳膜厚作为器件应用和观察磁畴的优值。见“特性长度”。

泡(畴)迁移率

bubble (domain) mobility

指沿畴径向单位梯度场所产生的泡畴的运动速度。表示符号为 μ_a 。

磁泡畴壁迁移率

domain-wall mobility of magnetic bubble

磁泡畴壁迁移率 μ_w 是单位磁场强度所产生的磁泡畴壁运动的速度。

泡畴迁移率和磁泡畴壁迁移率都是器件设计的重要参数。一般要求磁泡畴壁迁移率为 25~2500 厘米/奥斯特·秒以上。表示式为

$$\mu_w = \frac{2r}{\alpha} \sqrt{\frac{A}{K}} \quad (\text{厘米/奥斯特·秒})$$

其中 r 为旋磁比, A 为交换积分常数, K 为磁结晶各向异性常数, α 为吉尔伯特(Gilbert)旋磁阻尼系数。

特性长度

characteristics length

特性长度是表示磁泡材料特性的物理量,它的大小为

$$l = \sigma_w / 4\pi M_s^2 = \sqrt{\frac{AK_u}{\pi M_s^2}}$$

式中 σ_w ——畴壁能量密度;

K_u ——磁晶各向异性;

A ——交换积分常数。

特性长度一般与成分有关。

特性长度是器件设计的重要参数,它反应材料泡径的大小,对石榴石铁氧体而言,

要求膜厚 h 为 $4l \leq h \leq 10l$ 。为了增大信息存储密度,必须使稳定的磁泡直径为最小。磁泡最小半径 r_{\min} 和膜厚 h 的关系为 $r_{\min} = h$ 。所以 l 愈大则泡径愈大,反之亦然。

泡畴矫顽力

bubble domain coercivity

使泡畴移动所需要的最小场差称泡畴矫顽力 H_{cd} 。其单位为安/米(或奥斯特)。

磁泡(畴)形成场

run out field of magnetic bubble (domain)

在具有垂直于膜面的单轴各向异性和等效各向异性场 $H_A \geq 4\pi M_s$ 的磁性薄膜(或薄片)中,当带状畴受到与磁化强度方向相反的外加磁场作用时,则带状畴受到压缩逐渐变成圆柱畴(泡畴)。磁泡形成场就是使带状畴刚变成圆柱畴(泡畴)时的外加磁场。它低于磁泡畴的破灭(缩灭)场。如在 4000 埃的非晶薄膜上观察到磁泡,磁泡畴形成场为 390 奥斯特,磁泡畴破灭(缩灭)场为 800 奥斯特。

磁泡(畴)破灭(缩灭)场

collapse field of magnetic bubble (domain)

当磁泡受到与磁化强度相反的外场作用时,磁泡受到压缩,泡径减小,当外加磁场增加到使磁泡破灭时的外加磁场,叫磁泡破灭场 H_{co} 。磁泡破灭场在磁泡器件设计中是不可缺少的一个参数。

磁泡破灭半径

collapse radius of magnetic bubble

即磁泡破灭前的最小半径,用符号 r_c 表示。

硬泡

hard bubble

若磁泡的畴壁是由布洛赫壁和奈耳壁交替排列构成的,则这种磁泡称为硬泡。若基本由布洛赫壁构成的,则称为正常泡。硬泡

的产生场和破灭场较正常泡为高;硬泡的直径变化较大(如从产生到破灭时直径的变化为 10:1),而正常泡的直径变化较小(如从产生到破灭时的直径变化为 3:1);硬泡的迁移率比正常泡小得多;正常泡在偏磁场变弱的梯度方向上移动,硬泡则是在与外加磁偏场梯度方向成一角度的方向移动。

硬泡对于磁泡存储器件的应用妨碍很大,由于它的存在往往造成泡畴传递的失误,所以要设法避免硬泡的出现。目前主要采用多层外延膜结构、离子注入和高温纯氮中退火等方法消除硬泡。

半泡

half bubble

圆柱形磁畴的高度小于材料(薄膜或薄片)的厚度,从而只在材料的一个表面出现的磁泡,这样的磁畴结构称为磁半泡。

液态磁泡

liquid magnetic bubble

将高度均匀弥散的铁磁液体放于密度相同的基质液体中,再将这一液体系统置于两个玻璃片间就可以形成液态磁泡。这种液态磁泡也可用外加磁场控制其运动,从而完成类似一般磁泡的运算等功能。

据估计这类液体磁泡器件的特点是使用频率低,可制成较大片器件,可用于显示技术。

磁泡(畴)器件

magnetic bubble (domain) devices

它是一种利用磁泡在偏磁场作用下,能在具有一定磁路或电路的磁泡材料中发生、传输、相互作用、分裂和消失的特性来完成信息的存储、记录和逻辑运算等功能的器件。如磁泡移位寄存器、磁泡存储器等。

磁泡移位寄存器是通过改变旋转磁场的方向和传输图形的设计来完成左右移位功能的。

磁泡存储器是利用磁泡的存在和不存在

两种状态以及磁泡在梯度场中运动等物理现象来完成存储功能的。它的功耗低（比半导体存储器低2~3个数量级），存储容量大，密度高（为 $4.5 \times 10^5 \sim 1.5 \times 10^{10}$ 位/厘米²），存取速度低于半导体存储器而高于磁盘、磁鼓。

目前还在研究用磁泡畴壁内磁矩旋转方向的不同来表示“1”和“0”状态，这种存储概念叫磁泡点阵存储。

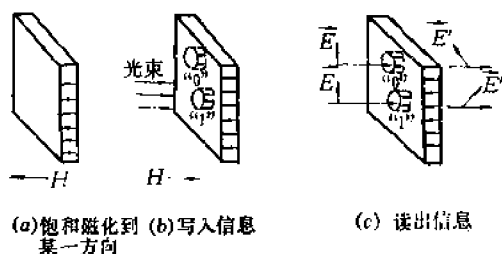
磁光存储技术

magneto-optical memory technique

是利用激光技术在磁光存储材料上进行信息写入和读出的技术。

磁光存储技术通常是利用热磁效应写入信息，利用磁光效应（法拉第效应或克尔效应）读出信息。

若利用居里点热磁效应写入信息时，则首先将存储介质在某一方向饱和磁化，再利用激光对需存储信息“1”的单元区域加热，使其温度超过居里点，并失去磁性。当激光去掉之后进行冷却时加上反向磁场（或利用退磁场当作写入场），该单元区域磁化强度方向与其它未加热区域相反，这就写入了信息“1”。而没有经照射的单元存储信息为“0”。若用法拉第效应读出信息时，则平面偏振光通过沿光传输方向磁化的存储介质时偏振面发生偏转，由于存储介质中磁化强度方向不同，偏振面偏转的方向和程度不同，从而可以读出原来所存储的信息是“1”还是“0”。存储原理见图示。



磁光存储原理图

此外，还可以利用光的干涉原理在磁光存储介质上进行信息的存储和再现，制成磁全息照相存储器。

磁光存储技术具有存储密度高（约 10^8 位/厘米²）、存取速度快、存储容量大的特点，但是由于操作技术复杂，目前正处于探索阶段。

磁光存储材料

magneto-optical memory materials

在可见光和红外波段内具有显著磁光效应的磁性材料称为磁光材料。某些磁光材料可借助热磁效应写入信息，借助磁光效应（法拉第效应或克尔效应）读出信息，具有这种功能的磁光材料为磁光存储材料。

目前研究较多的磁光存储材料有锰-铋薄膜、钆铁石榴石、氧化铈等。对于这种材料的要求是：优质系数高；具有垂直于膜面的易磁化方向；热磁写入温度要低，一般转变温度在 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 较合适。

锰铋膜

Mn-Bi film

它是以锰铋为主要成分的一种NiAs型六角系金属间化合物的磁性薄膜，其易磁化轴平行于c轴。制备锰铋膜可采用真空蒸发，用金属铋和锰作原料，按先铋后锰的顺序依次蒸发在玻璃（或云母）基片上，蒸发时真空度约为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 托，在 $230 \sim 300^\circ\text{C}$ 真空退火处理几分钟到几小时，使锰铋合金化。膜厚约为500~1000埃。为防止氧化，在表面沉积一层二氧化硅（或一氧化硅）保护层。

这种膜的特点是工艺简单，法拉第旋转角较大，优质系数较高，是目前磁光存储器和磁全息存储器利用较多的一种记录材料。其缺点是居里点高，写入功率大，做磁全息存储器的存储介质时衍射效率低。

热磁写入

thermomagnetic writing

是磁光存储材料借助于光的照射使其局

部温度变化,在外场作用下得到两种不同磁化状态而实现的信息写入。它可分为居里点热磁写入、矫顽力热磁写入、抵消点热磁写入和磁致伸缩热磁写入等。

逐位存储方式

bit by bits memory type

在光存储系统中,利用热磁效应在存储介质的一个个小区域上,直接存储一个个二进制数字信息的存储方式,叫逐位存储方式。

这种方式利用热磁效应写入信息,利用磁光效应(法拉第效应或克尔效应)读出信息。这种方式的优点是存储密度大,系统简单,数据传输率较高。缺点是可靠性差,信息易丢失,对机械运转和磁光介质的完美性

要求较高。

磁全息照相存储方式

magneto-holographic memory type

系在光存储系统中,采用全息照相技术,在磁光材料存储介质的一个个小区域上,存储一页页的二进制数字信息的存储方式。

这种存储方式与逐位存储方式相比,具有较多优点。例如,完全摆脱了机械运动系统,可靠性高,一页页写入或读出,数据传输率高;每一位的信息分布在整个全息图上,灰尘和介质缺陷的影响小,信息不易丢失。因而磁全息照相存储方式是光存储系统中一种很有前途的存储方式。

六、旋磁材料与器件

旋磁效应

gyromagnetic effect

当电子自旋磁矩受到稳恒磁场作用时, 它要围绕这一稳恒磁场按右旋(右手螺旋)方向进动, 这种进动称拉莫尔(Larmor)进动。磁性材料中由于存在损耗, 只有同时受到高频交变磁场作用时, 这种进动才能继续下去。这时磁导率呈张量形式。电磁波在磁性材料(媒质)中的传播特性与磁矩的进动有关。由于这种现象的存在, 可以产生一系列的旋磁效应, 如铁磁共振效应, 极化(偏振)面旋转效应(法拉第旋转效应), 以及当高频场增大时的非线性效应等。利用这些效应可以制成各种互易和非互易器件, 如隔离器、环行器、相移器、限幅器等。广泛地应用于微波电路中。

旋磁比

gyromagnetic ratio

是原子或离子的电子总磁偶极矩与其总动量矩的比值, 用符号表示, 即

$$r = g \frac{\mu_0 |e|}{2m_e} = 2\pi \times 1.76 \times 10^4 g \text{ 赫} \cdot \text{米} / \text{安}$$

式中 e 、 m_e ——电子电量和静止质量;

g ——谱线裂距因数, 简称 g 因子;

μ_0 ——真空中的磁导率 ($4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨} / \text{米}$)。

在 CGS 单位制中

$$\frac{r}{2\pi} = \frac{|e|g}{2m_e c} = 1.4 \times 10^8 g \text{ 赫} / \text{奥}$$

$$\text{或} \quad \frac{|e|g}{2m_e c} = 8.8 \times 10^8 g \text{ 弧度} / \text{秒} \cdot \text{奥}$$

张量磁化率

tensor susceptibility

各向异性的旋磁材料, 在一般情况下, 其磁化强度 \vec{M} 与磁场强度 \vec{H} 并不在一个方向上, 它们在空间上的关系为

$$\vec{M} = \vec{\chi}_i \vec{H}$$

式中 $\vec{\chi}_i$ 为张量磁化率, 可用矩阵表示为

$$(\vec{\chi}) = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & \chi_{xz} \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & \chi_{yz} \\ \chi_{zx} & \chi_{zy} & \chi_{zz} \end{pmatrix}$$

对各向同性旋磁材料, 当处在饱和稳恒磁场和其它任意方向交变磁场的同时作用下, 其磁化强度 \vec{m} 与交变内磁场 \vec{h} 一般也不在一个方向上, 在线性近似的条件下它们之间的关系为

$$\vec{m} = \vec{\chi}_h \vec{h}$$

其中 $\vec{\chi}$ 称为旋磁张量磁化率, 可用矩阵表示为

$$(\vec{\chi}) = \begin{pmatrix} \chi & -j\chi_a & 0 \\ j\chi_a & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

张量磁导率

tensor permeability

各向异性的旋磁材料, 在一般情况下, 其磁感应强度 \vec{B} 与磁场强度 \vec{H} 并不在一个方向上, 它们在空间上的关系为

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{\mu}_i \vec{H}$$

式中 $\vec{\mu}_i$ 为张量磁导率, 可用矩阵表示为

$$(\vec{\mu}_i) = \begin{pmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{pmatrix}$$

对各向同性旋磁材料, 当处在饱和稳恒磁场和其它任意方向交变磁场作用下, 其交变磁感应强度 \vec{b} 与交变内磁场 \vec{h} 一般也不在一个方向上, 在线性近似的条件下它们之间

的关系为

$$\vec{b} = \mu_0 \vec{\mu} \vec{h}$$

式中 $\vec{\mu}$ 称为旋磁张量磁导率, 亦称坡耳德耳 (Polder) 张量, 表示为

$$(\vec{\mu}) = \begin{pmatrix} \mu & -jK & 0 \\ jK & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中 μ 、 K 为 $\vec{\mu}$ 的复数分量, μ 称为对角分量, K 称为非对角分量, 它们的表示式是

$$\mu = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad K = \frac{-\omega \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

式中 $\omega_0 = \gamma H_0$, $\omega_m = \gamma M_s$

$\vec{\mu}$ 与 $\vec{\mu}$ 的关系是

$$\vec{\mu} = \vec{I} + \vec{\mu}$$

式中 \vec{I} 是单位张量。

右 (正) 旋、左 (负) 旋圆极化 (偏振) 标量磁导率

right (positive), left (negative) circular polarization scalar permeability

各向同性的旋磁材料或媒质, 在稳恒磁场和与其相垂直的右 (正)、左 (负) 圆极化磁场同时作用下, 旋磁张量磁导率便成为右 (正) 旋、左 (负) 旋圆极化标量磁导率 $\mu_{\pm} = \mu \mp K$ 。

横向有效标量磁导率

transverse effective scalar permeability

平面电磁波在横向磁化的各向同性旋磁材料或媒质中传播时, 当其交变内磁场分量在垂直于稳恒磁场的情况下, 传播常数为

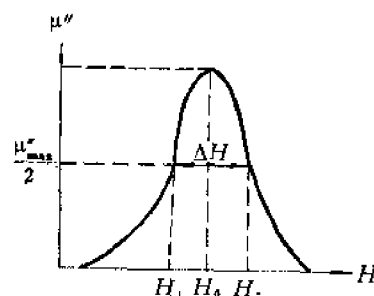
$$\gamma_{\perp} = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu_{\perp} \mu_0} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon \mu_{\perp}}$$

式中 ϵ 为介电常数; ω 为电磁波的角频率, c 为真空中的光速 ($c = 3 \times 10^8$ 米/秒); ϵ_0 、 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率; $\mu_{\perp} = \frac{\mu^2 - K^2}{\mu}$ 称为横向有效标量磁导率。

铁磁共振线宽

ferromagnetic resonance linewidth

当交变场的频率固定, 调节外加稳恒磁场, 发生铁磁共振, 旋磁张量磁导率的对角分量虚部为极大值的 $\frac{1}{2}$ 时 ($\mu'' = \frac{1}{2} \mu''_{\max}$) 所对应的两个磁场之差称为铁磁共振线宽 (简称线宽) $\Delta H = |H_2 - H_1|$, 见图示。



铁磁共振线宽

一般情况下, 线宽是表示微波铁氧体材料磁损耗的一个参数。

有效 (共振) 线宽

effective (resonance) linewidth

是表示微波铁氧体材料在 (铁磁) 共振磁场以外的磁损耗的一个参数, 它同铁磁共振线宽相似, 是从旋磁张量磁化率推导出来的, 有效线宽定义为

$$\Delta H_{eff}(H_i) = 8\pi M \cdot I_m \left(\frac{1}{\chi''_+} \right)$$

式中 H_i ——材料的内磁场;

M ——材料的磁化强度;

$I_m \left(\frac{1}{\chi''_+} \right)$ ——右旋张量磁化率 χ''_+ 倒数的虚部。

因此有效线宽可从张量磁化率的测量中得到。

自然共振

natural resonance

旋磁材料主要在磁晶各向异性场和磁畴结构产生的退磁场作用下, 由外加交变场所引起的铁磁共振现象称为自然共振。

低场损耗

low field loss

旋磁材料在稳恒磁场远低于铁磁共振磁场时的磁损耗。一般着重考虑自然共振所引

起的损耗。

极化面 (偏振面) 旋转效应

polarization plane rotation effect

线性极化 (偏振) 电磁波在纵向磁化 (外加磁场平行于传播方向) 的旋磁材料中传播时, 极化 (偏振) 面发生旋转的效应。当外场低于共振磁场时, 旋转方向与稳恒磁场成右旋关系, 而与传播方向无关。这是一种非互易效应, 利用这一效应可以制作非互易微波器件, 如环行器、隔离器等。

法拉第旋转效应

Faraday rotation effect

即“极化面 (偏振面) 旋转效应”。

自旋波

spin wave

由于热骚动或其它因素影响, 磁有序体中某些对磁性有贡献的电子自旋偏离了原来的有序排列方向, 这个局部偏离的自旋进动, 由于交换作用及磁偶极矩等相互作用, 将向磁有序体的其它部分传播, 这种自旋进动状态的传播就是自旋波。它是磁有序体中自旋的集体运动模式。

自旋波 (共振) 线宽

spin wave (resonance) linewidth

波数为 k 的自旋波由于阻尼作用, 其振幅将衰减, 当振幅衰减到初始振幅的 $\frac{1}{e}$ 所需要的时间, 称为自旋波的弛豫时间 τ_k , 根据这一弛豫时间, 可定义波数为 k 的自旋波线宽为

$$\Delta H_k = \frac{2}{\gamma \tau_k}$$

式中 γ 为材料的旋磁比。

ΔH_k 也是表示与微波材料磁损耗有关的一个量。

静磁模

magnetostatic mode

是自旋波的长波部分, 在这种条件下可略去交换作用, 只考虑磁偶极矩相互作用。

当磁体的尺寸足够小, 使得电磁波在其中的传播效应可略去时, 可用静磁方法来得出的自旋波模式称为静磁波。例如实验中出现的多共振峰现象, 一般就是由这种模式造成的。

静磁表面波

magnetostatic surface wave

沿磁性材料表面传播的静磁波, 称为静磁表面波。其振幅自表面向体内按指数衰减。利用静磁表面波的传播特性可制成频散延迟线、非互易器件。

临界磁场

critical field

当交变磁场强度超过某一数值 h_c 时, 旋磁材料的自旋波通过参量激发迅速增长, 例如出现辅峰和铁磁共振线宽变宽等现象, 这种现象称为非线性效应或自旋波的非稳定性。习惯上也称为高功率效应。 h_c 就称为临界 (磁) 场或阈 (磁) 场。

阈磁场

threshold field

即“临界磁场”。

磁弹耦合效应

magnetoelastic coupling effect

是弹性波和自旋波模之间能量的转移。当波数为 k 的自旋波的频率 ω_k 同弹性波的频率和波数相等时才会发生强烈的磁弹性耦合。这时自旋波和弹性波的能量互相转换。

微波铁氧体材料

microwave ferrite materials

在微波频率下, 金属磁性材料, 由于电阻率低, 涡流损耗及趋肤效应严重, 已不能使用。但某些电阻率很高的铁氧体多晶和单晶, 则是在这个波段具有实际使用意义的磁性材料。

使用于微波频率的铁氧体材料, 要求具有良好的旋磁性能和低的损耗, 在一般使用情况, 表征材料性能的主要参数有铁磁共振

线宽、 g 因子、旋磁张量磁导率、饱和磁化强度、居里点、介电常数、介电损耗角正切等。

在微波领域内广泛使用的多晶铁氧体材料有尖晶石、石榴石、磁铅石(六角晶系)三种结晶结构型。一般尖晶石型成本低廉,石榴石型某些特性优良,磁铅石(六角晶系)型具有高的各向异性,适用于毫米波段。

单晶目前主要用石榴石型材料。但由于石榴石型材料磁矩较低,在高微波频段其它两种单晶亦有使用。

生产多晶微波材料,一般采用陶瓷工艺。生产单晶用助熔剂法、拉晶法等。

石榴石型微波铁氧体材料

garnet type microwave ferrite materials

具有石榴石型晶体结构的微波铁氧体材料,化学式为 RFe_3O_{12} (R 代表钇和稀土元素)。

钇铁石榴石(YIG)具有较窄线宽,小的各向异性和低的介电损耗。钇铁石榴石易于进行离子代换,可以得到不同参数的材料以满足不同器件需要。例如对多晶钇铁石榴石,用铝部分代换铁可制备饱和磁化强度在200~1780高斯之间的材料。

无钇或少钇的钙钒石榴石,具有成本低,饱和磁化强度低,居里点高的特点,用铈离子部分代换铁离子可以降低磁晶各向异性,目前已制出多晶的钇钙钒铈铁石榴石,线宽达1.5奥斯特。

利用多晶石榴石型微波铁氧体材料可作成环行器、隔离器等器件。使用钇铁石榴石单晶材料可以制成磁调滤波器、限幅器等器件。使用块状单晶棒(或盘)以及外延生长的单晶膜,可制成电调延迟线。

生产多晶石榴石一般用陶瓷工艺。生产单晶多采用助熔剂法。单晶膜用液相外延或气相外延工艺制取。

尖晶石型微波铁氧体材料

spinel type microwave ferrite materials

具有尖晶石型晶体结构的微波铁氧体材料,化学式为 MFe_2O_4 (其中 M 代表二价金属离子)。主要有镁系、镍系、锂系等系列,这类材料通过离子代换可以改变材料的一些磁特性,例如通过离子代换,饱和磁化强度约在500~5000高斯之间变化,共振线宽一般在几十到数百奥斯特。常在这些系统中用铝或镓离子代换铁离子以降低饱和磁化强度,加入铜可以降低烧结温度,提高密度。加入少量钴降低磁晶各向异性,以降低线宽。

这类材料常用于波导旋磁器件中,其中锂铁氧体具有良好的矩形回线,适于锁式器件应用。

磁铅石型(六角晶系)微波铁氧体材料

magneto-plumbite type microwave ferrite materials

这类材料属于六角晶系结构,一般具有高的磁晶各向异性。

已应用的六角晶系微波材料主要有M型、W型。它们可以通过不同的离子代换使各向异性场在6000~50000奥之间改变。例如共振式器件当工作频率到达毫米波段时共振场必须超过上万奥斯特。这样高的外磁场不易达到,利用这类材料的磁晶各向异性场后,只须外加较低的稳恒磁场,便可以制成毫米波器件。

旋磁器件

gyromagnetic devices

指利用磁性材料的旋磁效应制成的微波器件,如环行器、隔离器、相移器、开关、滤波器、限幅器等器件。

正向损耗

forward loss

指隔离器或环行器等器件中,电磁波沿

能量衰减较小的方向传播时的插入损耗。一般以分贝为单位。用符号 α_r 表示。

反向损耗

reverse loss

指隔离器或环行器等器件中, 电磁波能量沿能量衰减较大的方向传播时的插入损耗(习惯亦称为隔离)。一般以分贝为单位。用符号 α_r 表示。

隔离器

isolator

是一种电磁波沿一方向传播时的衰减比相反方向传播大得多的两端口器件。

隔离器用在微波电路中作去耦元件。例如雷达发射机输出的电磁波传输到天线时, 常会有一部分能量被反射, 因而影响发射机的正常工作。加入隔离器后, 反射回来的电磁波绝大部分被隔离器吸收, 保证了发射机的正常工作。

极化面(偏振面)旋转式隔离器

polarization plane rotation isolator

是利用极化(偏振)面旋转效应(法拉第旋转效应)的隔离器。

一般工作在 5~36 千兆赫, 近来在毫米波段应用也较多。

法拉第旋转式隔离器

Faraday rotation isolator

即“极化面(偏振面)旋转式隔离器”。

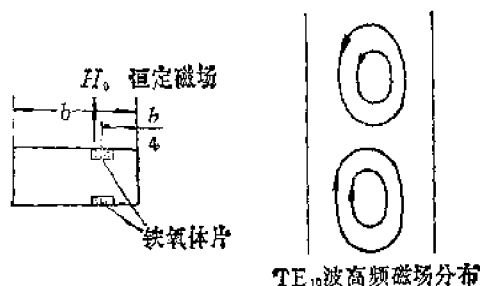
共振式隔离器

resonance isolator

根据铁氧体的铁磁共振特性(即对右圆极化波的高频磁场有共振吸收现象, 而对左圆极化波则不出现共振吸收)可以利用波导、同轴线或带线做成承受较高功率的隔离器, 这种隔离器称为共(谐)振式隔离器。

以矩形波导为例(见图), 在波导宽边离波导壁约 1/4 边长处, 就存在圆极化的高频磁场。而且, 对不同方向传输的电磁波, 在同一点处的圆极化方向相反。如果在这里

放置铁氧体片, 并加上谐振磁场, 则对左圆极化的正向波衰减很小, 而对右圆极化的反向波产生很大的衰减。



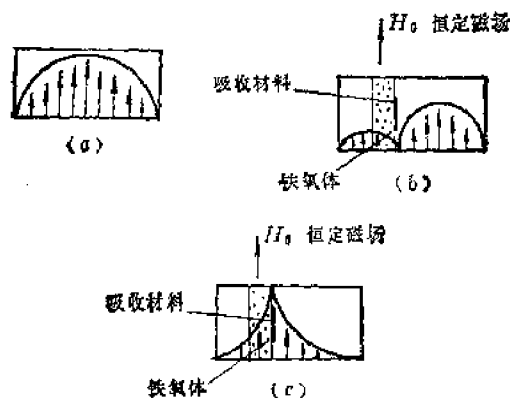
共振式隔离器的工作原理

场移式隔离器

field displacement isolator

将包含有微波铁氧体材料的传输线横向磁化(外加磁场方向垂直于传播方向), 则传输线中的电磁场分布与磁化方向及传播方向有关。利用这种现象制成的隔离器称为场移式隔离器。

波导场移式隔离器主要用在厘米波段, 也可用在毫米波段。但承受功率低, 主要用在低驻波高隔离的精密微波测试系统中。



场移式隔离器的工作原理

(a) 矩形波导 TE_{10} 波电场分布; (b) 波导内部分填充横向磁化铁氧体片时对正向传输 TE_{10} 波的场移; (c) 对反向传输 TE_{10} 波的场移。

边导模隔离器

edge guide mode isolator

当以横向磁化的微波铁氧体为介质的带线或微带线的中心导体宽度远大于铁氧体厚

度时, 电磁波传播的主模式是边导模。这种模式的主要特点是当电磁波沿某一方向传播时, 能量集中于带线的一边。当沿反方向传播时, 能量集中于另一边。而且这种能量的集中与频率无关。利用这种模式制成的隔离器叫边导模隔离器。具有宽频带的优点。可达多倍频程。

集总元件隔离器

lumped element isolator

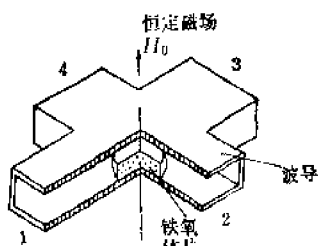
是一种各端口内部都与集总元件网络相连的隔离器。目前主要用于微波频率低频段和甚高频段, 可显著缩小隔离器的尺寸。

环行器

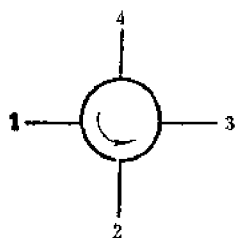
circulator

是一种多端口器件。在这种器件中输入任一端口的功率, 按照一定顺序传输到下一个端口。如图所示四端环行器就以 $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4 \cdots$ 顺序传输, 如果外加磁场反向, 环行顺序也相反, 即按 $4 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1 \cdots$ 顺序传输。

环行器在微波电路中可用作双工器 (在一个天线上同时进行接收和发射的双重操作) 和单端放大器 (如二极管参量放大器) 的输入和输出间的隔离。



1 波导四端环行器



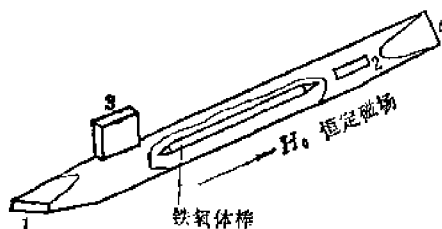
2 四端环行器功率传输顺序

极化面 (偏振面) 旋转式环行器

polarization plane rotation circulator

是利用极化 (偏振) 面旋转效应 (法拉第效应) 制成的环行器。又称法拉第旋转式环行器。它是早期应用的一种波导铁氧体微波器件, 近年来逐渐被结环行器所取代。目前尚应用在毫米波段。

利用法拉第旋转效应, 在 TE_{11} 模激励的圆波导中心放置一根轴向磁化的铁氧体圆柱, 则 TE_{11} 波的偏振面就会沿铁氧体棒旋转, 其旋转角度随外面纵面磁场而增加。这就是一个法拉第旋转器。如图所示, 将一个 45° 法拉第旋转器配合适当的波导安排: 1 与 4 臂, 2 与 3 臂在几何结构上均差 45° ; 2 与 4 臂, 1 与 3 臂各互相垂直。这样, 就构成一个法拉第旋转式环行器。1 与 3 臂, 2 与 4 臂本身是隔离的。1 臂输入信号的偏振面经 45° 旋转后正好与 2 臂波导宽边垂直, 信号就耦合到 2 臂输出。依此类推, 就完成了 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ 的环行。



极化面旋转式环行器

法拉第旋转式环行器

Faraday rotation circulator

即“极化面 (偏振面) 旋转式环行器”。

结环行器

junction circulator

是由微波铁氧体材料和传输线结所构成的环行器。如波导结环行器, 带线结环行器, 微带结环行器等。

结环行器可采用高场 (工作场高于铁磁共振场) 工作方式或低场工作方式, 高场工作时频带较窄, 多用于微波的低频段。低场

工作时频带较宽, 采用适当匹配技术可达到倍频程。

Y 型环行器

Y-circulator

Y型环行器是最典型的结环行器。它是在一个三端 120° 轴对称的波导或带线结的中心放置铁氧体片并垂直加上恒定磁场所构成。具有结构简单、性能良好等优点, 得到广泛应用。

T 型环行器

T-circulator

为了结构上便于与别的器件连接, 也可将铁氧体片放在 T 形传输线结处来构成 T 型环行器。这样, 由于结构上的不对称, 所以电气性能较差。因此, 经常是做成 Y-T 型的环行器, 环行器的中心部分是 Y 形, 其中两臂各弯转 30° , 外形仍成 T 形。

同轴环行器

coaxial line circulator

现在通用的同轴环行器, 都是在带线结中心导体的两边, 各放一个铁氧体圆片, 再沿垂直方向加恒定磁场所构成。带线的各臂再与同轴接头连结起来。这样就构成一个同轴环行器。

微带环行器

microstrip line circulator

微波集成电路的发展, 要求将铁氧体器件微带化。根据带线环行器的原理, 在铁氧体基片上印刷一定形状的微带电路, 并沿垂直方向磁化所需部分, 就构成一个全铁氧体基片结构的微带环行器。为了和别的元件集成在同一块基片上, 也可在高纯度的氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷基片上打一个与所需铁氧体圆片相同大小的孔, 将铁氧体片镶嵌进去, 经研磨、抛光并印刷上微带电路后, 再对铁氧体片加横向磁场。这样就构成一个“镶嵌式”结构的微带环行器。

集总参数环行器

lumped parameter circulator

是一种各端口内部都与集总元件网络相连接的环行器。又称集总元件结环行器。

在较低的微波频段(频率低于 1 千兆赫)运用 Y 型带线环行器的原理制作环行器显得太大, 太重; 因此, 可以在带线中心导体结处构成集总参数的电感, 同时在各臂加上适当数值的电容来分别调谐各个臂。这样, 用结构紧凑、体积小的集总参数元件来代替分布参数的带线, 就使环行器体积大大减小。

这种环行器目前主要用于微波频率低频段和甚高频段。采用薄膜工艺制成的集总参数环行器, 可用于微波集成电路。

集总元件结环行器

lumped element junction circulator

即“集总参数环行器”。

相移式环行器

phase shift circulator

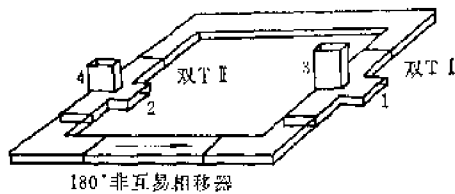
是至少含有一个非互易相移器的环行器。在这种环行器中需要有一定数量的多端口的互易元件。这种环行器可承受较高的功率。

大功率环行器

high-power circulator

各种环行器都有一定的功率限制, 当输入功率超过一定值(阈限功率)时, 铁氧体出现非线性效应, 插入损耗急剧增加, 环行器的性能严重变坏。即使采取措施, 也不能使承受功率超过几百瓦(连续波)。在大功率的情况下, 一般都用双 T、方向耦合器等互易元件与能承受高功率的铁氧体相移器等组合而成。图示为用两个双 T 和一个 180° 非互易相移器所组成的环行器。图中, 两个双 T 之间联结波导的电长度是相等的, 而相移器仅对从左面输入的信号产生 180° 的相移。这样, 由 1 臂输入的信号到达双 T II 时是同相, 就从 2 臂输出; 从 2 臂输入的信号到达

双T I 时是反相, 就从 3 臂输出。依此类推, 就实现了 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ 的环行。



大功率环行器

低温环行器

cryogenic circulator

铁氧体材料的主要参数都是随环境温度变化的, 因而每个铁氧体微波器件都有一定的工作温度范围。通常, 低温环行器是指供深度冷冻的低噪声接收机前置参量放大器 (工作于 4.2°K 或 80°K 的低温) 所用的环行器。

锁式旋磁器件

latching gyromagnetic device

是利用具有一定矩磁特性的材料制成并工作在剩磁状态的旋磁器件。

铁氧体开关

ferrite switch

指利用微波铁氧体的旋磁效应制成的微波电路开关。铁氧体开关常用环行器作成, 通过改变外磁场方向来完成开关作用。磁路结构可分成内回路式和外回路式, 前者开关能量低, 速度快, 后者频带较宽。一般采用锁式, 开关时间可达微秒级。特点是能承受较大功率, 插入损耗较小。

微波铁氧体相移器

microwave ferrite phase shifter

利用铁氧体材料的磁化强度或张量磁导率随外加磁场变化的特性, 在波导、同轴线或带线内按各种方式放置铁氧体片或棒, 或在铁氧体基片上印制微带线, 用这样的方法来改变传输电磁波的相位。这样构成的相移器叫做微波铁氧体相移器。

微波铁氧体相移器的种类繁多, 按结构

可分为波导的、同轴的、带线的或微带的相移器; 按互易性可分为互易的和非互易相移器; 按工作方式 (激励方式) 可分为连续 (模拟) 和步进 (数字) 相移器; 按功率容量有高功率和低功率相移器等。其最主要的参数是其品质因数 (或称优值), 以度/分贝表示, 即 1 分贝衰减时能达到的相移量。各种铁氧体相移器在相控阵雷达天线各单元的相位控制和通信系统中都有广泛的应用。

铁氧体调制器

ferrite modulator

是一种利用交变外磁场控制微波铁氧体材料旋磁效应对电磁波进行调制的器件, 诸如调相器、调幅器等。

铁氧体调相器

ferrite phase modulator

能对通过它的微波信号进行相位调制的铁氧体器件, 叫做铁氧体调相器。它是在一段矩形波导中沿轴线方向放置一根铁氧体棒, 波导外面绕上线圈而构成的。当线圈中通以电流时, 便在波导内产生纵向磁场, 遂使铁氧体棒磁化。微波信号通过该波导, 其相位受磁化铁氧体棒的影响而发生变化。载流线圈的安匝数越大, 所产生磁场越强, 相位改变也越大。反之越小。当线圈中通以交变电流时, 则传输的微波受到交变调制而成为交变调相波。

铁氧体调幅器

ferrite amplitude modulator

对微波信号进行幅度调制的铁氧体器件, 叫做铁氧体调幅器。结构与调相器类似。不同的是在铁氧体棒中间夹有平行于波导宽边的喷涂镍铬合金电阻薄膜的云母片。当微波信号通过波导时, 由于受到磁化铁氧体中电阻薄膜的影响而产生衰减。其衰减量与载流线圈的安匝数成比例。因此, 输出的微波信号的幅度、随着衰减大小而变化成为微波调幅波。

钇铁石榴石单晶器件

yttrium iron garnet (YIG) single crystal device

是利用钇铁石榴石(YIG)类型单晶的旋磁效应制成的器件。例如旋磁滤波器、磁调旋磁振荡器、旋磁限幅器等。这类器件的主要特点是可采用快速无机械运动的磁调谐方式工作,而且调谐频率范围宽。主要用于电子对抗以及扫频仪、数字式微波频率计等系统中。

磁调谐腔

magnetically tunable resonant cavity

在谐振腔内微波磁场最强的位置放置适当大小的铁氧体,利用铁氧体的张量磁导率随外磁场变化的特性,就可实现电磁调谐。铁氧体的加入,必然使腔的Q值下降。因此,必须使用损耗极低的铁氧体材料,例如钇铁石榴石单晶。

旋磁滤波器

gyromagnetic filter

工作在铁磁共振频率下的强磁体,其共振频率可借改变恒稳磁场而改变,利用这种现象制成的滤波器叫旋磁滤波器。一般应用钇铁石榴石类型的单晶小球或圆盘等作谐振器。其主要特点是可制成线性磁调谐和非互易性的滤波器。

磁场的改变往往用改变电流的方式来实现,因此除有时称磁调滤波器外,也称电调滤波器,这种器件体积小,适于集成化。

电调滤波器

electrically tunable filter

即“旋磁滤波器”。

磁调旋磁振荡器

magnetically tunable gyromagnetic oscillator

工作在铁磁共振频率下的强磁体,其共振频率可借改变稳恒磁场而改变。利用它作为谐振回路元件的固体振荡器叫磁调旋磁振

荡器。通常也称钇铁石榴石调谐振荡器。主要特点是可在宽频带内磁调谐。

旋磁限幅器

gyromagnetic limiter

利用旋磁材料的饱和效应等非线性效应制成的限幅器。一般大多应用钇铁石榴石类型的单晶制成旋磁限幅器。利用不同的非线性效应可构成不同限幅电平的限幅器。例如利用钇铁石榴石低电平限幅特性制成的磁调限幅器,兼有滤波和限幅的作用,其主要特点是限幅作用对频率有选择性。

微波铁氧体混合集成电路

microwave ferrite hybrid integrated circuit

指含有微波铁氧体器件的混合集成电路。这些铁氧体器件主要有微带线的环行器、隔离器、相移器、滤波器、限幅器、开关等。铁氧体材料也可用来作这种集成电路的基片。

磁光器件

magneto-optical devices

磁光器件是指利用材料的磁光效应制作的各种器件。利用磁光器件可对激光束的强度、相位、频率、偏振方向及传输方向进行控制。例如,利用磁光法拉第效应可制成与现有磁波法拉第效应器件相类似的一系列光学器件,如调制器、隔离器、旋转器、环行器、相移器、锁式开关、Q开关等快速控制激光参数的器件。这器件可用于激光雷达、测距、光通信、激光陀螺、红外探测和激光放大器等系统的光路中。

磁光调制器

magneto-optical modulator

指利用磁光效应对光束进行调制的器件。目前常用钇铁石榴石型单晶制作磁光调制器,对激光束的强度进行调制。这类晶体在近红外范围的法拉第旋转角大,透光性能良好。

七、磁性材料制备工艺●

氧化物法

conventional ceramic technique

指用氧化物作为原材料、采用一般陶瓷工艺制备铁氧体粉末的方法。其制备过程大致为：配料→球磨→预烧→球磨→成型→烧结→磨加工。

配料：按照预定的配方，准确地称出各种所需的原料。

球磨：将各种原材料与适当大小的钢球（可以加入液体，如水、酒精；或者不加入液体）在钢筒内进行球磨（球磨有滚动和振动二种），球磨时间一般为数小时至数十小时，预烧前球磨的主要作用是使原材料混合均匀。预烧后球磨的主要作用是磨细。

预烧：将混合的料粉在高温炉中加热，预烧温度一般低于烧结温度，保温时间为数十分钟至数小时。预烧的目的是便于控制产品的收缩率和促进固相反应，使之初步形成铁氧体。

烧结：烧结是铁氧体制备中的关键工艺。烧结温度一般为1000~1400℃，保温时间为数十分钟到数十小时。而且，不同的产品要求不同的气氛。如锰锌铁氧体要求在真空或在含有微量氧的氮气或CO₂-H₂的平衡气氛中烧结，而镍锌铁氧体、六角系铁氧体则采用通氧气的办法，可进一步提高性能。

磨加工：由于铁氧体硬而脆，只能采用磨加工来达到尺寸精度和光洁度。一般用碳化硅砂轮在水冷下加工。

盐类热分解法

thermal decomposition of salts

在铁氧体制备中，可使用金属盐类（如硫酸盐、草酸盐、氯化物等）为原材料。将有

关的盐类混合后加热分解，可以得到制备铁氧体的混合氧化物粉末。这种方法的优点是粉末的活性较氧化物法制得的粉末强，因此能制造性能较好的铁氧体。其缺点是热分解时往往放出有害气体。可溶性盐类热分解法的工艺流程大体是：按配方称取盐类→混合去水→加热分解→球磨→成型→烧结。

共沉淀法

coprecipitation

又称湿式法。它不是直接用氧化物作原材料，而是在制备铁氧体用的可溶性盐类混合溶液中加入沉淀剂，通过控制适当的化学反应条件（温度与酸碱度等），使几种金属离子共同沉淀下来。所制取的混合均匀的料粉再经过成型、烧结等工艺制成铁氧体。

所用可溶性盐类有硫酸盐、硝酸盐、氯化物等，沉淀剂可用氢氧化钠、氢氧化铵、草酸铵、碳酸盐等。

共沉淀法的优点是：料粉细，活性强，成份均匀，工艺简单，易制成优质铁氧体。

热压

heat pressing

也称“加压烧结”，是将铁氧体粉料或预压成型的毛坯在外加压力的作用下进行烧结，其烧结温度一般为900~1350℃，低于一般的烧结温度。热压的优点是能控制产品的显微结构，能达到高的密度。热压已应用在记录磁头，微波铁氧体器件及磁光存储器等

● 磁单晶生长技术方面词汇，如“坩埚熔体生长法”（“布里兹曼法”）、“溶盐生长法”（“助熔剂生长法”）、“提拉法”、“助熔剂提拉法”等，见“半导体”（章）“半导体工艺”（节）和“电子陶瓷和晶体”（章）“晶体生长和加工工艺”（节）。

方面。

喷雾干燥法

spray drying

这种干燥方法是使盐类水溶液或料粉悬浮液通过喷嘴或旋转的圆盘喷成雾状,经过热气流快速干燥,最后得到直径为几微米至几百微米的圆球。喷雾干燥法的优点是干燥迅速,干燥后的固体为小圆球,流动性好。

在铁氧体制造中,喷雾干燥可用于盐类的脱水,一次球磨料的干燥,以及干压粉料的造粒。这种工艺的优点是可以降低劳动强度,生产率高,粉料的均匀性和一致性好,产品质量高。

注浆法

slip casting

这种方法是把铁氧体粉末制成悬浮的料浆,然后注入石膏模中,铸成规定的尺寸。它适于制造形状复杂的大型铁氧体产品(例如电视用的偏转磁芯)。用这种方法制出形状复杂的产品密度较高,均匀性好。

平衡气氛烧结法

sintering in equilibrium atmosphere

指在烧结铁氧体时控制气氛,使氧分压和铁氧体的分解压相平衡的烧结方法。采取这种方法烧结锰锌铁氧体,可以防止铁离子和锰离子的氧化与还原,以获得所需要的成分。在平衡气氛下烧结的锰锌铁氧体具有优良的磁性能。一般是采取控制真空度或惰性气体中的氧含量来平衡气氛的。

热处理

heat treatment

磁性材料的热处理,指在磁性材料或合金的熔点以下各种规范(温度、持续时间、冷却速度、气氛、外加磁场等)下的加热处理过程。它分正火、退火、淬火、回火以及在保护气氛中热处理和在磁场中热处理等。它是磁性材料制备工艺中的一个重要环节,借以改变内部组织状态来达到所要求的性

能。

例如,金属软磁材料一般要经过退火来消除内应力,提高磁导率;铝镍钴型永磁体须经磁场热处理来改进磁的各向异性,提高最大磁能积,等等。

磁场成型

pressing under magnetic field

指磁性材料粉末在恒定磁场中加压成型。它能使粉末定向排列,使易磁化轴或易磁化平面与磁场方向平行,从而大大提高磁性材料的性能。采用这种方法可得到各向异性的磁体。

磁场成型主要用于制造稀土钴永磁,铁氧体永磁,以及平面型六角晶系铁氧体。

带工艺

tape process

是目前生产铁氧体存储磁芯最常用的一种成型技术。即是将预烧后的铁氧体粉末与一定数量和浓度的胶合剂均匀混合,轧制成具有一定韧性和厚度的铁氧体薄带,并在切割机上纵向切割成具有一定宽度(5~6毫米)的窄带,而后用带料冲制环形磁芯生坯。

这种成型工艺的优点是,生坯一致性好,生产率高。

金属镀膜工艺

filming techniques for magnetic metal

磁性金属成膜技术常用的有下述几种。

1. 真空蒸发淀积(vacuum evaporation deposition)——在高真空(10^{-6} 毫米汞柱)中加热金属或合金,使之蒸发,气态的金属或合金原子升到置于上方的玻璃或介质基片上冷却成为固态,遂在基片上淀积成一定厚度的合金薄膜(膜厚可由蒸发速度和时间来控制)。这种工艺,制备微波集成电路也多采用。

2. 阴极溅射(cathode sputtering)——与真空蒸发淀积类似,只是加热系统不同。这种工艺由电子束轰击金属或合金,使

之局部熔化并溅射到工件表面上。对于难熔金属常采用这种工艺。它的优点是避免了杂质的影响,易于控制膜厚。

3. 化学电镀 (chemical electroplating)——制备磁镀线或微波集成电路,常采用这种一般的电镀工艺。化学电镀以所用镀层金属作为正极,被镀的表面作为负极,电解液用化学方法配制。将被镀的导线或微波集成电路基片放入电镀槽内,经一定时间即镀出所需的金属膜面。

液相外延工艺

liquid phase epitaxial (LPE) method

这是一种与半导体异质外延工艺相似的制备铁氧体单晶薄膜的方法。

将一定比例的铁和稀土元素的氧化物和适量的助熔剂(如氧化铅加氧化硼或氧化钡加氧化硼)加以混合,在高温(通常在1000℃以上)下熔融成均匀的液相,降至某一过饱和温度,把抛光的单晶基片(一般用钇镓石榴石,简称“GGG”或“三G”)浸入其中,遂在基片上生长出一层石榴石单晶薄膜。

这种工艺可制成用于磁泡器件、旋磁器

件、磁声表面波器件以及磁光器件的铁氧体单晶薄膜。

液相外延的优点是,工艺操作简单,薄膜生长速度快,可用热处理控制其生长感生各向异性,对多成分薄膜易于控制等。缺点是膜厚不易均匀,膜中易混进助熔剂所含元素等。

化学气相淀积工艺

chemical vapor deposition (CVD) method

这是一种淀积生长铁氧体单晶薄膜的工艺。用氩气(或氮气)作为运载气体,将气相化的金属氯化物与氧气混合,当混合气体流过处于反应温度下的单晶基片(如用钇镓石榴石等切割抛光而成)时,遂在单晶基片上沉积成铁氧体单晶薄膜。

这种方法还不很成熟,其生长理论和生长工艺尚在研究之中。它的优点是薄膜厚度较均匀而且易于控制厚度。缺点是生长速度慢,不易长厚,工艺操作和工艺设备复杂等。所制取的铁氧体单晶薄膜的用途,参见“液相外延工艺”。

八、磁性测量仪器

磁化装置

magnetizing assembly

为了从铁磁样品中获得宏观上可以测量的磁性,必须借助于外磁场的激发,使样品内部的磁结构发生变化,而将物质的磁性表现出来,因此,外磁场是进行磁性测量的必要条件,而产生可供利用的磁场的设备叫做磁化装置。常用的磁化装置有螺线管(包括单圈、多圈螺线管和螺绕环)、电磁铁、超导磁体等。

磁化装置也可用于永磁体的充磁。

亥姆霍兹线圈

Helmholtz's coils

亥姆霍兹线圈是用以产生均匀弱磁场的装置。它由半径相同而且结构完全一样的两个圆线圈组成,两线圈平行共轴放置,两线圈平面之间的距离等于其半径。亥姆霍兹线圈能在中央部分的较大空间范围内产生高度均匀的磁场,可用来作为磁场的标准器件或用于抵消地磁场对测量仪器的影响。

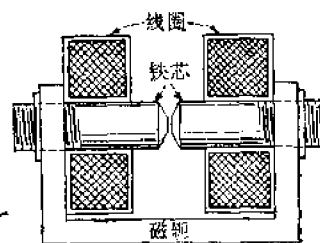
电磁铁

electromagnet

电磁铁是在磁测量中常用以产生强磁场的装置。在原理上,电磁铁相当于一个具有气隙的铁芯线圈。当线圈中通过电流而使铁芯磁化时,气隙中的磁通量由铁芯中的磁感应强度决定,由磁路定律可估算出空隙中的磁场强度。按此原理设计制造的电磁铁种类很多。电磁铁两极间磁场的强度和均匀性与励磁电流、两极间的距离和极头形状有关。当极间距离和极头形状一定时,场强随励磁电流的增加而增加。当励磁电流和极头形状一定时,磁场的强度和均匀性随两极间距离的

减少而增强。常用的极头形状有圆柱形和圆锥形两种,前者所产生的磁场均匀范围大,后者可以产生更强的磁场。为产生均匀强磁场,要求极头加工时表面光洁度高,严格互相平行,采用优质纯铁或铁钴合金制造。

电磁铁在工业技术、一些元件或设备中均有广泛的应用。



电磁铁结构

脉冲强磁装置

pulse strong magnetic field assembly

用电磁铁产生强磁场时,受铁芯磁饱和与散热速率的限制,一般只能产生3万奥斯特以下的场强,其最高极限也仅达5万奥斯特。近年来,为使高矫顽力材料达到技术饱和磁化,需要能产生6~8万奥斯特的磁化装置。常采用水冷螺线管,用特殊设计的发电机或电容器放电,对螺线管供电,产生脉冲强磁场。脉冲磁场的持续时间一般只有几秒,甚至几毫秒或更短。目前的脉冲强磁场可达几万~几十万奥斯特。

超导磁体

superconducting magnet

用铌锆、铌锡、铌铝锆等耐强磁场的超导材料绕成的磁体,在极低的温度(临界温度)下,通以一定的电流(小于临界电流)时,可以得到很高的强磁场,目前可以做到3万~15万奥斯特,这是普通电磁铁所不能

达到的。由于超导体没有电阻发热,节省了发热消耗的大量功率和冷却系统的设备,但却需要产生极低温度的液氦设备。这种强磁体可用于高能物理研究和某些磁测量设备上,还可用于磁流体发电研究等。

磁导计

permeameter

在测量软磁材料磁特性时,常使用具有闭合磁路的样品(如环形、方框形),其特点是漏磁通很小,磁化时内部没有退磁场存在,因而样品所表现的磁性就是材料的磁性。但由于磁化线圈产生的磁场较低,不能用于永磁材料的磁测量。

用外加磁轭使条形样品闭合,并可达达到均匀磁化的装置称为磁导计。

磁轭通常用磁导率高、矫顽力小的片状材料制成,以减小磁通变化时的涡流影响。磁导计既保持了开路样品在磁性测量中便于更换的好处,又具有磁路闭合的优点,因而在工业产品检验中得到广泛的应用。

冲击检流计

ballistic galvanometer

是根据磁场与电流相互作用原理制成的高灵敏度电测量仪器,常用于测量瞬时电流的电量或瞬时电动势的时间积分。在结构上与一般磁电式直读仪表一样,由永久磁体和活动线圈两个主要部分组成。其特点是活动线圈的转动惯量大,电流脉冲的持续时间比电流计的自由振动周期小很多。

冲击检流计与一个面积和匝数(线圈常数)为已知的测量线圈配合,可用来测量磁性材料在直流磁场中的磁化曲线、磁滞回线和有关参量。样品中磁感应强度的变化使绕在样品上的测量线圈产生感应电动势,测量

线圈接到冲击检流计上,检流计的偏转角与磁感应强度的变化成正比,并可用互感器进行校准。

磁通计

fluxmeter

是应用电磁感应定律测量感应电动势对时间的积分,也就是测量磁通量变化的直读仪表。结构与冲击检流计相似,所不同的仅是活动线圈用扭力系数极小的细丝(如蚕丝)悬挂,因而悬丝的恢复力矩甚微。它作为直读仪表使用方便,但其灵敏度、准确度比冲击检流计差一些。

磁通计又叫麦克斯韦计。

高斯计

gaussmeter

当一通有电流的金属或半导体薄片置于磁场中时,若电流方向与磁场垂直,则在垂直于电流和磁场的方向上就会产生电动势,这种现象称为霍尔效应。霍尔电动势与磁场强度成正比,其比例系数称作霍尔系数。选取霍尔系数大的材料(如锗、铟化铟)作测量探头,用以检测出霍尔电压即可确定磁场强度。应用这一原理制作的磁场强度测量仪称作高斯计。

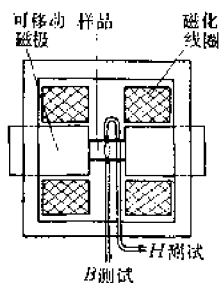
高斯计原称为霍尔效应磁强计。

磁秤

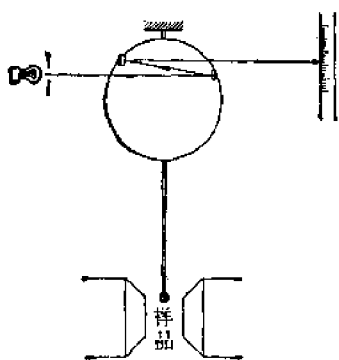
magnetic balance

系指用力学方法测量磁性材料磁化强度的一种仪器。当磁性体放进非均匀磁场中时,要受到一个沿磁场梯度方向的力的作用,力的大小正比于磁场梯度和磁性体的磁化强度。采用特殊形状的电磁铁极头,以得到仅在一个空间方向上的磁场梯度,而且此梯度在一个相当大的体积范围内是均匀的。当样品被磁化到饱和时,检测样品受到的力和磁场梯度,即可计算出样品的饱和磁化强度值。磁场梯度可使用标准样品(如纯镍)进行校准。

测量样品受力的方法很多,如天平、环



磁导计结构



磁秤结构

秤、扭秤等。

核磁共振磁场测量仪

nuclear magnetic resonance magnetometer

是利用原子的核磁矩在直流磁场和交变磁场共同作用下所发生的核磁共振吸收现象来测量磁场强度的仪器。共振频率由 $\omega_0 = \gamma H$ 确定, γ 是核子旋磁比。通常用的核子是氢核(质子)和锂核。质子的旋磁比 $\gamma = 26751.3$ 奥斯特⁻¹·秒⁻¹, 锂核的旋磁比 $\gamma = 10396.1$ 奥斯特⁻¹·秒⁻¹。只要测出共振时交变磁场的频率, 即可确定磁场强度。若被测磁场强度在 $10^2 \sim 10^4$ 奥斯特范围内, 则共振时交变场的频率约为 $10^6 \sim 10^8$ 赫, 属于射频范围, 用外差式频率计或数字式频率计可精确地测定频率, γ 也可测得非常准确, 所以, 核磁共振法测量磁场强度是目前很准确的方法, 测量精确度可达十万分之一。

振动样品磁强计

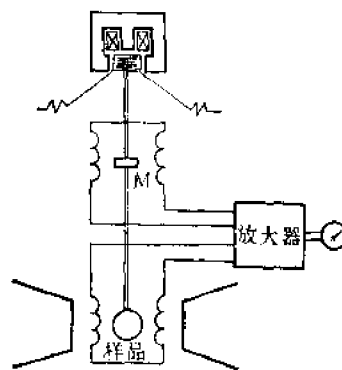
vibrating specimen magnetometer

振动样品磁强计的原理是通过测量磁化了的样品振动时在探测线圈中所产生的感应信号, 来推算样品的磁特性。

一种简单的振动样品磁强计结构如图所示。使用均匀主磁场将样品磁化, 由一个类似扬声器的器件使样品在垂直方向振动。当样品与探测线圈之间距离比样品本身尺寸大得多时, 可以把样品所产生的磁场看作磁偶

极子所产生的磁场, 这个偶极子场在探测线圈中感应出交变信号, 把这信号与参考磁体 M 所产生的信号相比较, 在振动幅度很小时, 输出信号比例于样品的磁化强度。

采用标准样品(如纯镍)校准样品的偶极场。当样品尺寸形状固定时, 可直接读出磁化强度。振动样品磁强计可用于测量磁性材料的饱和磁化强度等参量, 测量效率高。



振动样品磁强计结构

振动线圈磁强计

vibrating coil magnetometer

其工作原理与振动样品磁强计相似。不同之处在于样品是固定的, 而探测线圈是振动的。探测线圈须以一定方式绕制, 以抵消主磁场感应的电压。

转矩仪

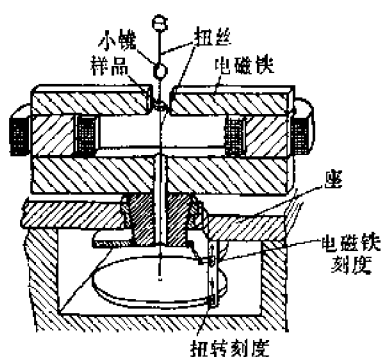
torque magnetometer

转矩仪是根据磁性样品在磁场中受力矩作用的原理来测量磁晶各向异性常数的仪器。

通常把单晶样品平行于特定晶面切割成圆片形状, 用一弹性细悬丝(如钨丝、石英丝等)把样品悬挂在均匀磁场中, 圆片平面平行于磁场方向。当磁场绕悬丝轴旋转时, 样品受到力矩作用而旋转, 力图使易磁化方向趋向外磁场方向, 而悬丝的反抗力矩使样品平衡在某一位置。通过悬丝上小镜对光线的反射, 从光标尺上可以读出悬丝被扭转的角度。测量扭转力矩、磁场转动的角度和样

品转动的角度,可确定样品的磁晶各向异性常数。

转矩仪又称转矩磁强计。



转矩仪结构

铁磁示波器

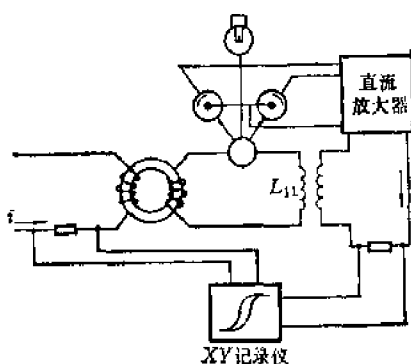
ferrograph

铁磁示波器是专供观测交流磁性的示波器。可用来直接观测动态磁滞回线。这种方法的优点是测量迅速。缺点是测量误差较大,一般超过5%。

直流磁性自动测试仪

D. C. automatic recording fluxmeter

其原理如图示。样品的次级线圈通过检流计连接到互感 L_{11} 的次级线圈,检流计的偏转引起两个光电管的光通量发生变化,不平衡的电压经过直流放大器放大,使互感 L_{11} 的初级电流自动调整到检流计的偏转实际上为零。在此条件下,互感的初级电流严格比例于样品的总磁通变化,在 XY 记录仪上描绘出 $B-H$ 曲线。它能高速度并较精确地测试磁性材料的直流磁特性。

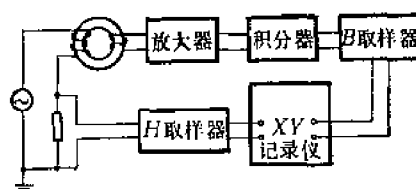


直流磁性自动测试仪

交流磁性自动测试仪

A. C. automatic recording fluxmeter

是用来测量各种磁性材料音频磁特性的装置。由于采用了 XY 记录仪作自动记录,因此,它能在环形样品上迅速地描绘出磁性材料的动态磁滞回线、动态磁化曲线和磁导率曲线。其工作原理如图示。



交流磁性自动测试仪

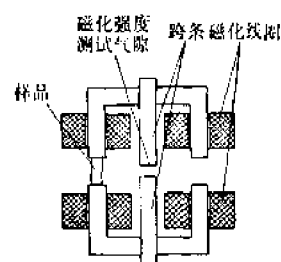
其基本原理是以铁磁示波器测试原理为基础。其不同之处在于并不是由示波器上直接观察磁滞回线,而是采用电子电路将磁滞回线上各点的 H 值及对应的 B 值逐点地顺序进行取样(即读出),并用 XY 记录仪进行记录,因此可在 XY 记录仪上描绘出来。

对称双轭磁导仪

symmetrical double yoke permeameter

是以磁平衡原理作基础,用测试发电机或高斯计作测试机构,达到快速、连续、直读永磁样品的剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和退磁曲线或最大磁能积 $(BH)_{max}$ 。适合于工厂成批检验产品。仪器结构如图示。

仪器的磁系统由两个对称双轭桥式磁导体组成,在磁导体上装有四个相同的磁化线圈,从而形成闭合的磁路。当不夹样品



对称双轭磁导仪结构

时,两个工作气隙处的磁场相等,中间气隙的磁场为零。当工作气隙夹入样品后,在中间气隙内就有与样品剩磁成正比的磁通,可用经过校准的仪表直接读出剩磁。磁场强度可用测试发电机或霍尔探头等进行测量。

英 文 索 引

- | A | 页码 | | 页码 |
|---|------|--|------|
| absolute permeability | 8-6 | conventional ceramic technique | 8-47 |
| absolute permeability of vacuum | 8-6 | conventional unit system for magnetism | 8-9 |
| A.C. automatic recording fluxmeter | 8-53 | coprecipitation | 8-47 |
| A.C.(D.C.) demagnetization | 8-5 | critical field | 8-40 |
| Al-Ni-Co-Fe permanent magnet | 8-21 | cryogenic circulator | 8-45 |
| Al-Ni-Co-Ti-Fe permanent magnet | 8-21 | current pulse basic characteristic | 8-29 |
| Al-Ni-Fe permanent magnet | 8-21 | cutoff frequency for soft magnetic materials | 8-12 |
| Al-Si-Fe alloy | 8-16 | cyclic magnetic condition | 8-5 |
| amorphous material for bubble (domain) | 8-34 | | |
| amplitude permeability | 8-8 | D | |
| antiferromagnetic materials | 8-2 | D.C. automatic recording fluxmeter | 8-53 |
| apparent permeability | 8-11 | delta noise | 8-30 |
| apparent quality factor | 8-13 | demagnetization curve | 8-19 |
| Armco iron | 8-15 | demagnetizing factor | 8-5 |
| | | demagnetizing factor tensor | 8-5 |
| B | | dimensional resonance | 8-12 |
| ballistic galvanometer | 8-51 | disaccommodation | 8-14 |
| biax (magnetic) core | 8-31 | disaccommodation factor | 8-14 |
| bit by bits memory type | 8-37 | domain wall | 8-4 |
| Bloch wall | 8-4 | domain wall displacement | 8-4 |
| break current | 8-30 | domain-wall mobility of magnetic bubble | 8-34 |
| break ratio | 8-30 | domain wall resonance | 8-12 |
| bubble diameter | 8-34 | drive ratio | 8-30 |
| bubble domain coercivity | 8-35 | dynamical magnetic neutralization | 8-5 |
| bubble (domain) mobility | 8-34 | | |
| C | | E | |
| carbonyl iron | 8-15 | edge guide mode isolator | 8-42 |
| characteristics length | 8-34 | effective permeability | 8-11 |
| chemical vapor deposition (CVD) method | 8-49 | effective quality factor | 8-13 |
| circulator | 8-43 | effective (resonance) linewidth | 8-39 |
| coaxial line circulator | 8-44 | electrical sheet | 8-15 |
| coercive field strength | 8-6 | electrically tunable filter | 8-46 |
| coercive force | 8-6 | electrolytic iron | 8-15 |
| coercivity | 8-6 | electromagnet | 8-50 |
| collapse field of magnetic bubble(domain) | 8-35 | elongated single domain (ESD) magnet | 8-22 |
| collapse radius of magnetic bubble | 8-35 | external magnetic circuit | 8-23 |
| complex permeability | 8-11 | | |
| composite permanent magnet | 8-23 | F | |
| | | Faraday rotation circulator | 8-43 |
| | | Faraday rotation effect | 8-40 |
| | | Faraday rotation isolator | 8-42 |

Fe-Al alloy	8-15	induced anisotropy	8-4
Fe-Co alloy	8-16	induced rectangular hysteresis loop	8-26
Fe-Ni alloy	8-15	induction factor	8-12
ferrimagnetic materials	8-2	initial magnetization curve	8-5
ferrite adsorbent materials	8-17	initial permeability	8-6
ferrite amplitude modulator	8-45	integrated magnetic core	8-33
ferrite antenna	8-18	internal magnetic circuit	8-23
ferrite modulator	8-45	intrinsic coercive force	8-6
ferrite permanent magnet	8-22	isolator	8-42
ferrite phase modulator	8-45		
ferrites	8-2	J	
ferrite switch	8-45	junction circulator	8-43
ferrograph	8-53		
ferromagnetic materials	8-2	K	
ferromagnetic resonance	8-9		
ferromagnetic resonance linewidth	8-39	knee current	8-29
ferroxplana	8-17		
Fe-Si alloy	8-15	L	
field displacement isolator	8-42		
filming techniques for magnetic metal	8-48	laminated ferrite memory planes	8-31
fluxmeter	8-51	latching gyromagnetic device	8-45
forward loss	8-41	limiting disturb current	8-30
fullness factor	8-19	liquid magnetic bubble	8-35
		liquid phase epitaxial (LPE) method	8-49
G		load line	8-20
		longitudinal magnetostriction constant	8-7
garnet type ferrites	8-3	loss per unit permeability	8-13
garnet type microwave ferrite materials	8-41	low field loss	8-39
gaussmeter	8-51	lumped element isolator	8-43
geometric demagnetizing factor	8-5	lumped element junction circulator	8-41
gyromagnetic devices	8-41	lumped parameter circulator	8-44
gyromagnetic effect	8-38		
gyromagnetic filter	8-46	M	
gyromagnetic limiter	8-46		
gyromagnetic ratio	8-38	machinable permanent magnet	8-21
		magnetic aftereffect	8-12
H		magnetic aftereffect loss	8-12
		magnetic aging	8-14
half bubble	8-35	magnetically ordered materials	8-2
hard bubble	8-35	magnetically tunable gyromagnetic oscillator	8-46
hard magnetic materials	8-20	magnetically tunable resonant cavity	8-46
heat pressing	8-47	magnetic amplifier	8-18
heat sensitive ferrite	8-17	magnetic anisotropy	8-3
heat treatment	8-48	magnetic antenna	8-18
Helmholtz's coils	8-50	magnetic (area) moment	8-1
hexagonal ferrites	8-3	magnetic balance	8-51
high-power circulator	8-44	magnetic bubble (domain)	8-33
hysteresis constant of core	8-14	magnetic bubble (domain) devices	8-35
hysteresis constant of magnetic material	8-13	magnetic bubble (domain) materials	8-34
		magnetic ceramics	8-2
I		magnetic core	8-17
incremental permeability	8-7		

magnetic core plane	8-30	loop	8-32
magnetic dielectric	8-16	metal soft magnetic materials	8-15
magnetic dipole	8-1	microstrip line circulator	8-44
magnetic dipole moment	8-1	microwave ferrite hybrid integrated circuit	8-46
magnetic energy product	8-19	microwave ferrite materials	8-40
magnetic head materials	8-24	microwave ferrite phase shifter	8-45
magnetic leakage factor	8-20	Mn-Bi film	8-36
magnetic materials and devices	8-1	Mn-Bi permanent magnet	8-22
magnetic memory	8-25	Mn-Zn ferrite	8-16
magnetic memory materials	8-25	Mössbauer effect	8-9
magnetic neutralization	8-4	multi-aperture core (device), MAD	8-31
magnetic plated wire	8-32		
magnetic polarization	8-1	N	
magnetic powder core	8-16	natural resonance	8-39
magnetic recording media	8-24	Neel wall	8-4
magnetic recording technique	8-24	Ni-Zn ferrite	8-17
magnetic resonance	8-8	normal hysteresis loop	8-6
magnetic spectrum	8-12	nuclear magnetic resonance	8-6
magnetic stray factor	8-20	nuclear magnetic resonance magnetometer	8-52
magnetizing	8-23		
magnetizing assembly	8-50	O	
magnetizing field	8-1	optimal operating bubble diameter	8-34
magneto-caloric effect	8-8	orthoferrites	8-3
magnetocrystalline anisotropy	8-3		
magnetocrystalline anisotropy constant	8-4	P	
magnetocrystalline anisotropy energy	8-3	paramagnetic resonance	8-9
magnetoelastic coupling effect	8-40	permanent magnet	8-20
magneto-holographic memory type	8-37	permanent magnetic materials	8-19, 8-20
magneto-optical devices	8-46	permeameter	8-51
magneto-optical effect	8-8	phase shift circulator	8-44
(magneto-optical) Faraday effect	8-8	photomagnetic effect	8-8
(magneto-optical) Kerr effect	8-8	piezomagnetic coupling factor	8-8
magneto-optical memory materials	8-36	piezo-magnetic effect	8-7
magneto-optical memory technique	8-36	piezo-magnetic materials	8-7
magneto-optical modulator	8-46	piezo-magnetic mechano-electronic coupling factor	8-8
magneto-plumbite type ferrites	8-3	planar coupled magnetic film	8-32
magneto-plumbite type microwave ferrite materials	8-41	planar ferrites	8-3
magneto-resistance effect	8-8	planar magnetic film	8-32
magnetostatic mode	8-40	planar magnetocrystalline anisotropy	8-4
magnetostatic surface wave	8-40	polarization plane rotation circulator	8-43
magnetostriction materials	8-7	polarization plane rotation effect	8-40
mainaxial magnetocrystalline anisotropy	8-4	polarization plane rotation isolator	8-42
Martensitic steel	8-20	power loss	8-13
maximum K value current	8-29	precipitation hardening type magnet	8-21
maximum magnetic energy product	8-19	pressing under magnetic field	8-48
maximum magnetic field strength	8-26	Pt-Co permanent magnet	8-22
maximum magnetic induction	8-26	pulse strong magnetic field assembly	8-50
maximum permeability	8-7		
memory element	8-25		
memory squareness ratio	8-27		
metallic magnetic materials with square			

		strong magnetic materials	8-2
		strong magnetic semiconductor	8-8
		superconducting magnet	8-50
		switching coefficient	8-27
		switching core	8-31
		switching squareness ratio	8-26
		symmetrical double yoke permeameter	8-53
		T	
		tangent of the loss angle	8-13
		tape process	8-48
		T-circulator	8-44
		temperature coefficient	8-14
		temperature coefficient of drive current	8-30
		temperature coefficient of μV_1	8-30
		tensor permeability	8-38
		tensor susceptibility	8-38
		thermal compensation alloy	8-16
		thermal decomposition of salts	8-47
		thermal magnetic neutralization	8-5
		thermomagnetic alloy	8-16
		thermomagnetic writing	8-36
		threshold field	8-27, 8-40
		toroidal memory core	8-28
		toroidal permeability	8-11
		torque magnetometer	8-52
		total loss of magnetic material	8-12
		train of the current pulse for testing core	8-28
		transverse effective scalar permeability	8-39
		turns factor	8-12
		twist magnetostriction	8-7
		twistor	8-33
		U	
		uniaxial anisotropy	8-4
		uniaxial ferrites	8-3
		V	
		vibrating coil magnetometer	8-52
		vibrating specimen magnetometer	8-52
		W	
		wired multi-aperture plate for memory	8-31
		working point	8-20
		Y	
		Y-circulator	8-44
		yttrium iron garnet (YIG) single crystal	
		device	8-46

Q

quality factor 8-13

R

rare earth-cobalt permanent magnet 8-22
 Rayleigh region 8-14
 recoil line 8-19
 recoil permeability 8-20
 recoil state 8-19
 rectangular hysteresis materials 8-26
 rectangular loop ferrite materials 8-27
 relative permeability 8-6
 remanence permeability 8-27
 remanence ratio 8-26
 resonance isolator 8-42
 response voltage pulse characteristic 8-28
 reverse loss 8-42
 reversible permeability 8-7
 right (positive), left (negative) circular polarization scalar permeability 8-39
 rotation magnetization 8-4
 run out field of magnetic bubble(domain) 8-35

S

saturation hysteresis loop 8-6
 semi-hard magnetic materials 8-23
 shape anisotropy 8-4
 silicon steel sheet 8-15
 single-domain body 8-4
 sintering in equilibrium atmosphere 8-48
 slip casting 8-48
 soft magnetic ferrites 8-16
 soft magnetic ferrite single crystal 8-17
 soft magnetic materials 8-11
 specific magnetization 8-1
 specific temperature factor of the permeability 8-14
 spin wave 8-40
 spin wave(resonance) linewidth 8-40
 spinel type ferrites 8-2
 spinel type microwave ferrite materials 8-41
 spontaneous magnetization 8-2
 spontaneous rectangular hysteresis loop 8-26
 spray drying 8-48
 squareness ratio 8-27
 static magnetic neutralization 8-5
 stress anisotropy 8-4

strong magnetic materials 8-2
 strong magnetic semiconductor 8-8
 superconducting magnet 8-50
 switching coefficient 8-27
 switching core 8-31
 switching squareness ratio 8-26
 symmetrical double yoke permeameter 8-53

T

tangent of the loss angle 8-13
 tape process 8-48
 T-circulator 8-44
 temperature coefficient 8-14
 temperature coefficient of drive current 8-30
 temperature coefficient of μV_1 8-30
 tensor permeability 8-38
 tensor susceptibility 8-38
 thermal compensation alloy 8-16
 thermal decomposition of salts 8-47
 thermal magnetic neutralization 8-5
 thermomagnetic alloy 8-16
 thermomagnetic writing 8-36
 threshold field 8-27, 8-40
 toroidal memory core 8-28
 toroidal permeability 8-11
 torque magnetometer 8-52
 total loss of magnetic material 8-12
 train of the current pulse for testing core 8-28
 transverse effective scalar permeability 8-39
 turns factor 8-12
 twist magnetostriction 8-7
 twistor 8-33

U

uniaxial anisotropy 8-4
 uniaxial ferrites 8-3

V

vibrating coil magnetometer 8-52
 vibrating specimen magnetometer 8-52

W

wired multi-aperture plate for memory 8-31
 working point 8-20

Y

Y-circulator 8-44
 yttrium iron garnet (YIG) single crystal device 8-46